



**TESIS TF 092325**

**PEMODELAN KAPAL PERANG**

**KELAS SIGMA *EXTENDED* SKALA 3 METER**

**BERBASIS EKSPERIMEN**

**RIDHO AKBAR**

**2412201021**

**PEMBIMBING :**

**Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**

**Aries Sulistyono, S.T., MA.sc., Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER**

**BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2014**



**THESIS TF 092325**

**MODELLING OF WARSHIP**

**SIGMA EXTENDED CLASS 3 METER SCALE**

**BASED ON EXPERIMENT**

**RIDHO AKBAR**

**NRP. 2412 201 021**

**ADVISORS :**

**Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**

**Aries Sulistyono, S.T., MA.sc., Ph.D.**

**MAGISTER PEROGAM**

**AREA OF INSTRUMENTATION ENGINEERING EXPERTISE**

**PHYSIC ENGINEERING DEPARTMENT**

**FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY**

**INSTITUT TECHNOLOGY OF SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2014**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :  
RIDHO AKBAR  
NRP. 2412 201 021

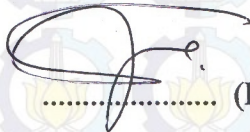
Tanggal Ujian : 15 Juli 2014  
Periode Wisuda : September 2014

Disetujui oleh :

1. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT.  
NIP. 19660116 198903 2 001

 (Pembimbing I)

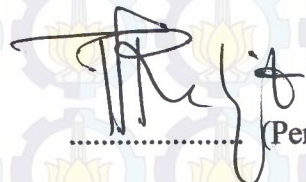
2. Aries Sulisetyono, ST.,MA.Sc, Ph.D.  
NIP. 19710320 199512 1 002

 (Pembimbing II)

3. Dr. Ir.Purwadi Agus Darwito, MSc.  
NIP. 19620822 198803 1 001

 (Penguji I)

4. Totok Ruki Biyanto,ST, MT, Ph.D.  
NIP. 19710702 199802 1 001

 (Penguji II)

5. Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D.  
NIP. 19780902 200312 1 002

 (Penguji III)



Direktur Program Pascasarjana,

  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.

NIP. 19640405 199002 1 001

# **PEMODELAN KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED* SKALA 3 METER BERBASIS EKSPERIMEN**

Nama Mahasiswa : RIDHO AKBAR  
NRP : 2412 201 021  
Pembimbing I : Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Pembimbing II : Aries Sulistyono, S.T., MA.sc., Ph.D.

## **ABSTRAK**

*Kapal perang kelas SIGMA extended adalah kapal perang pada tahap desain oleh tim konsorsium KNRT (Kementrian Negara Riset dan Teknologi) 2012. Kapal tersebut dirancang berdasarkan kapal perang pendahulunya yaitu kelas Ship Integrated Geometric Modularity Approach (SIGMA). Penelitian ini difokuskan pada evaluasi kriteria dan memperoleh parameter kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter berbasis eksperimen. Kapal prototipe ini dilengkapi oleh perangkat seperti pengendali, Global Positioning Sistem (GPS), IMU (Inertial Measurement Unit), wireless Local Area Network (LAN), speed log, pengkondisi sinyal, sistem propulsi propeller dan penggerak rudder. Seluruh komponen instrumen terintegrasi secara serial ke komputer client yang berperan sebagai pengendali utama kapal. komputer client terintegrasi dengan komputer server yang berada di darat melalui sistem komunikasi wireless Virtual Private Network (VPN). Pengendali utama ditanamkan alogaritma turning circle dan zig-zag sesuai aturan International Maritime Organization (IMO). Performansi pengujian turning circle 35 derajat diperoleh jarak advance, transfer dan tactical diameter sebesar 3,3 Lpp, 1,8 Lpp dan 3,3 Lpp. Performansi pengujian zig-zag 10 derajat diperoleh overshoot pertama dan overshoot kedua sebesar 6,81 derajat dan 6,88 derajat. Performansi pengujian zig-zag 20 derajat diperoleh overshoot pertama sebesar 12,6 derajat. Hasil pengujian telah sesuai dengan standar manuver yang diatur oleh IMO. Parameter model dinamika Nomoto yang dihasilkan antara lain  $K$  sebesar 0,014,  $T_1$  sebesar 0,052,  $T_2$  sebesar 0,56 dan  $T_3$  sebesar -14,286.*

**Kata kunci :** Kapal perang, SIGMA extended, IMU, GPS, LAN, turning circle, zig-zag

# MODELLING OF WARSHIP SIGMA EXTENDED CLASS WITH 3 METER SCALE BASED ON EXPERIMENT

Student : RIDHO AKBAR  
NRP : 2412 201 021  
Advisor : Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Co- advisor : Aries Sulistyono, S.T., MA.sc., Ph.D.

## ABSTRACT

*SIGMA extended class warship is a warship at the design stage by the consortium team Ministry of Research and Technology (KNRT) in 2012, where the ship is the issue of the development dimension, reliable in battle and maneuver. Designed by its predecessor warship class Ship Integrated Geometric Modularity Approach (SIGMA). This research focused on evaluate criteria and obtain the dynamics of the model parameters warship class SIGMA extended 3 meter scale based on experiments. Ship prototype is equipped by devices such as controllers, Global Positioning System (GPS) Inertial Measurement Unit (IMU), wireless LAN (Local Area Network), speed log, signal conditioning, propulsion systems propeller and rudder. All component of the instrument are connected in series to a client computer that acts as the main controller board. client computer integrated with a computer server that are on the ground through a wireless communication system Virtual Private Network (VPN). The main controller embedded algorithms turning circle and zig-zag according to the rules of International Maritime Organization (IMO). Performance testing 35 degree turning circle obtained advance, transfer and tactical diameter of 3.3 Lpp, Lpp 1.8 and 3.3 Lpp. Performance testing of zig-zag 10 degrees obtained first overshoot and second overshoot of 6,81 degrees and 6,88 degrees. Performance testing of the zig-zag 20 degrees obtained first overshoot of 12.6 degrees. The test results are in accordance with the standards set by the maneuver that the IMO. Nomoto dynamics model parameters were generated from 0.014 for K, 0.052 for  $T_1$ , 0.56 for  $T_2$  and -14.286 for  $T_3$ .*

**Keywords:** Warships, SIGMA extended, IMU, GPS, LAN, turning circle, zig-zag

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Alloh SWT., atas segala karunia dan ridho-Nya, sehingga tesis penelitian dengan judul **“Pemodelan Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* Skala 3 Meter Berbasis Eksperimen”** ini dapat diselesaikan pada waktunya. Sholawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW., sebagai teladan paling sempurna bagi penulis.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Rekayasa Instrumentasi pada program studi Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penyusunan tesis ini, penulis tidak terlepas dari bimbingan dan arahan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya, kepada :

1. Orangtua yang tiada hentinya memberi dukungan dalam bentuk apapun kepada penulis.
2. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Aries Sulistyono, S.T., MAsc, Ph.D. selaku pembimbing yang meluangkan waktu dan memberi pengarahan kepada penulis sehingga tesis ini selesai pada waktunya.
3. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, MSc., Totok Ruki Biyanto, ST, MT, Ph.D., dan Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D. yang telah memberikan saran dan pengarahan.
4. Wimala Lalitya Dhanistha yang telah memberikan perhatian dan semangat.
5. Program beasiswa *Fresh Graduate* Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya.
6. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang meminjamkan sarana prasarana dan member dukungan kepada penulis untuk melanjutkan ke jenjang pendidikan S2.

7. Teman – teman D3 Teknik Fisika dan S1 Teknik Perkapalan yang membantu dalam pelaksanaan pengujian eksperimen.
8. Teman – teman S2 periode 2012 – 2014 yang selalu bersemangat.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah membantu selesainya tesisi ini.

Penulis berdoa semoga Allah SWT membalas semua kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penulisan tesis ini. Amin ya Rabbal ‘Alamiin. Dengan segala keterbatasan, penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna untuk itu masukan dari pembaca senantiasa ditunggu untuk perbaikan. Penulis berharap semoga tesis ini membawa manfaat.

Surabaya, Juli 2014

Ridho Akbar

## DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL ID .....	i
LEMBAR JUDUL EN .....	iii
LEMBAR PENGESAHAN .....	v
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xvi
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Manfaat .....	3
1.5 Batasan Masalah .....	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Kajian Pustaka .....	5
2.2 Ukuran Pokok Kapal .....	6
2.2.1 Ukuran Memanjang / Membujur .....	6
2.2.2 Ukuran Melintang / Melebar .....	7
2.2.3 Ukuran Tegak (Vertikal) .....	7
2.3 Variabel Gerak Kapal .....	7
2.4 Model Dinamika Nomoto .....	9
2.5 Rudder .....	10
2.6 Propeller .....	12
2.7 Standard Manuver Kapal .....	12
2.7.1 <i>Turning Circle</i> .....	13
2.7.2 <i>Zig-Zag</i> .....	15



2.8 Froude Number .....	17
2.9 Formula Vincenty .....	17
2.10 Software Matlab .....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	23
3.1 Kapal SIGMA <i>Extended</i> Skala 3 Meter .....	24
3.2 Perancangan Perangkat Keras ( <i>Hardware</i> ) .....	25
3.2.1 Sistem Daya .....	26
3.2.2 Sensor dan Aktuator .....	27
3.2.3 Sistem Pengendali .....	33
3.2.4 Sistem Komunikasi .....	34
3.3 Perangkat Lunak ( <i>Software</i> ) .....	34
3.3.1 <i>Software</i> Berbasis Matlab GUI pada Komputer <i>Client</i> .....	35
3.3.2 <i>Software</i> Berbasis Matlab GUI pada Komputer <i>Server</i> .....	36
3.3.3 Algoritma <i>Zig-Zag</i> Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer <i>Client</i> .....	37
3.3.4 Algoritma <i>Turning Circle</i> Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer <i>Client</i> .....	39
3.3.5 Algoritma Program Mikrokontroler <i>Slave</i> 1 .....	40
3.3.6 Algoritma Program Mikrokontroler <i>Slave</i> 2 .....	41
3.3.7 Algoritma Program Mikrokontroler <i>Slave</i> 3 .....	42
3.3.8 Algoritma Program Mikrokontroler <i>Master</i> .....	43
3.3.9 Algoritma <i>Software</i> GUI Berbasis Matlab pada Komputer <i>Client</i> .....	44
3.3.10 Aplikasi <i>Formula Vincenty</i> Berbasis Matlab GUI .....	45
3.4 Skenario Pengujian Kapal .....	46
3.5 Perhitungan Parameter Dinamika Kapal Perang SIGMA <i>Extended</i> Skala 3 Meter Secara Nomoto .....	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	53
4.1 Hasil Eksperimen Pengujian <i>Turning Circle</i> pada Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> Skala 3 Meter .....	53
4.1.1 Hasil Eksperimen Pengujian <i>Turning Circle</i> 35 Derajat .....	54
4.1.2 Hasil Eksperimen Pengujian <i>Turning Circle</i> 20 Derajat .....	55
4.1.3 Hasil Eksperimen Pengujian <i>Turning Circle</i> 10 Derajat .....	57
4.2 Hasil Eksperimen Pengujian <i>Zig-Zag</i> pada Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> Skala 3 Meter .....	58

4.2.1 Hasil Eksperimen Pengujian <i>Zig-Zag</i> 10 Derajat .....	59
4.2.2 Hasil Eksperimen Pengujian <i>Zig-Zag</i> 20 Derajat .....	60
4.3 Evaluasi Kriteria Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> Skala 3 Meter .....	60
4.3.1 Evaluasi Kriteria Kapal Pada <i>Turning Circle</i> 35 Derajat .....	61
4.3.2 Evaluasi Kriteria Kapal Pada <i>Turning Circle</i> 20 Derajat .....	62
4.3.3 Evaluasi Kriteria Kapal Pada <i>Turning Circle</i> 10 Derajat .....	63
4.3.3 Evaluasi Kriteria Kapal pada <i>Zig-Zag</i> 10 Derajat .....	65
4.3.4 Evaluasi Kriteria Kapal Pada <i>Zig-Zag</i> 20 Derajat .....	66
4.4 Hasil Evaluasi Kriteria Pengujian Manuver Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> Skala 3 Meter .....	66
4.5 Hasil Perhitungan Parameter Nomoto Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> Skala 3 Meter .....	67
4.6 Validasi Model Dinamika Kapal Perang Kelas SIGMA secara <i>Open Loop</i> .....	68
BAB V_KESIMPULAN .....	71
5.1 Kesimpulan .....	71
DAFTAR PUSTAKA .....	73
BIOGRAFI PENULIS .....	75

**----Halaman ini sengaja dikosongkan----**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Standard notasi 6 derajat kebebasan (DOF) pada kapal (SNAME, 1950) .....	8
<b>Gambar 2.2</b> Sistem Kemudi Van Amorengen (Fossen, 1994) .....	11
<b>Gambar 2.3</b> Diagram blok kendali rudder (Fossen, 1994) .....	11
<b>Gambar 2.4</b> Prosedur <i>turning circle</i> (Fossen, 2011) .....	14
<b>Gambar 2.5</b> Pengujian <i>zig-zag</i> 20 derajat pada kapal kontainer (Fossen, 2011). 16	
<b>Gambar 2.6</b> Pengujian <i>zig-zag</i> 10 derajat pada kapal perang (Fossen, 2011) .....	16
<b>Gambar 2.7</b> Sistem koordinat WGS 84 (geographicsystem.blogspot.com) .....	18
<b>Gambar 2.8</b> <i>Software</i> Matlab 2013b ( <a href="http://www.mathworks.com/products/matlab/">http://www.mathworks.com/products/matlab/</a> ) .....	20
<b>Gambar 2.9</b> <i>Menu editor</i> Matlab .....	21
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian .....	23
<b>Gambar 3.2</b> <i>Linesplan</i> Kapal SIGMA extended .....	24
<b>Gambar 3.3</b> Kapal SIGMA <i>extended</i> skala 3 meter .....	25
<b>Gambar 3.4</b> Perancangan <i>hardware</i> instrumentasi .....	26
<b>Gambar 3.5</b> Baterai dan <i>charger</i> .....	27
<b>Gambar 3.6</b> (a) Modul GPS ublox (b) Antena GPS .....	28
<b>Gambar 3.7</b> Sensor IMU ( <i>Inertial Measurement Unit</i> ) .....	29
<b>Gambar 3.8</b> Pemasangan <i>speed log</i> pada prototipe kapal SIGMA <i>extended</i> .....	30
<b>Gambar 3.9</b> (a) Sensor sonar bagian kiri kapal (b) Sensor sonar bagian depan kapal (c) Sensor sonar bagian kanan kapal .....	31
<b>Gambar 3.10</b> Motor servo sebagai penggerak rudder .....	32
<b>Gambar 3.11</b> Motor <i>brushless</i> sebagai penggerak propeller .....	32
<b>Gambar 3.12</b> <i>Software</i> berbasis matlab GUI pada komputer <i>client</i> .....	35
<b>Gambar 3.13</b> <i>Software</i> berbasis matlab GUI pada komputer <i>server</i> .....	36
<b>Gambar 3.14</b> (a) Alogaritma <i>zig-zag</i> menurut standar IMO (b) Alogaritma <i>zig-zag</i> kapal secara otomatis pada <i>software</i> matlab GUI .....	38
<b>Gambar 3.15</b> (a) Alogaritma <i>turning circle</i> menurut standar IMO (b) Alogaritma <i>turning circle</i> kapal secara otomatis pada <i>software</i> matlab GUI .....	40
<b>Gambar 3.16</b> Algoritma program pada mikrokontroler <i>slave</i> 1 .....	41
<b>Gambar 3.17</b> Algoritma program pada mikrokontroler <i>slave</i> 2 .....	42
<b>Gambar 3.18</b> Algoritma program pada mikrokontroler <i>slave</i> 3 .....	43
<b>Gambar 3.19</b> Algoritma program pada mikrokontroler <i>master</i> .....	44
<b>Gambar 3.20</b> Algoritma eksekusi program pada matlab GUI komputer <i>client</i> ...	45

<b>Gambar 3.21</b> <i>Formula vincenty</i> diaplikasikan pada matlab GUI.....	45
<b>Gambar 3.22</b> Lokasi pengujian kapal di kolam Graha Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya. ....	46
<b>Gambar 3.23</b> Sekenario pengujian kapal .....	47
<b>Gambar 3.24</b> Kecepatan kapal SIGMA <i>extended</i> asli dan skala model.....	48
<b>Gambar 3.25</b> Pemilihan data <i>sample heading</i> pada data pengujian <i>turning circle</i> 20 derajat .....	49
<b>Gambar 4.1</b> Data rudder dan <i>heading</i> pengujian <i>turning circle</i> 35 derajat.....	54
<b>Gambar 4.2</b> Data koordinat GPS pengujian <i>turning circle</i> 35 derajat .....	55
<b>Gambar 4.3</b> Data rudder dan <i>heading</i> pengujian <i>turning circle</i> 20 derajat.....	56
<b>Gambar 4.4</b> Data koordinat GPS pengujian <i>turning circle</i> 20 derajat .....	56
<b>Gambar 4.5</b> Data rudder dan <i>heading</i> pada pengujian <i>turning circle</i> 10 derajat.....	57
<b>Gambar 4.6</b> Data koordinat GPS pengujian <i>turning circle</i> 10 derajat .....	58
<b>Gambar 4.7</b> Data rudder dan <i>heading</i> pengujian <i>zig-zag</i> 10 derajat.....	59
<b>Gambar 4.8</b> Data rudder dan <i>heading</i> pengujian <i>zig-zag</i> 20 derajat .....	60
<b>Gambar 4.9</b> Evaluasi kriteria pengujian <i>turning circle</i> 35 derajat.....	61
<b>Gambar 4.10</b> Evaluasi kriteria pengujian <i>turning circle</i> 20 derajat .....	63
<b>Gambar 4.11</b> Evaluasi kriteria pengujian <i>turning circle</i> 10 derajat.....	64
<b>Gambar 4.12</b> Evaluasi kriteria pengujian <i>zig-zag</i> 10 derajat .....	65
<b>Gambar 4.13</b> Evaluasi kriteria pengujian <i>zig-zag</i> 20 derajat .....	66
<b>Gambar 4.14</b> Respon <i>heading</i> pada saat pengujian <i>turning circle</i> dengan masukan sudut rudder 20 derajat .....	68
<b>Gambar 4.15</b> Respon <i>heading</i> pada saat pengujian <i>turning circle</i> dengan masukan sudut rudder -20 derajat.....	69

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Deskripsi notasi dan derajat kebebasan (Fossen, 2011) .....	8
<b>Tabel 2.2</b> Standar manuverabilitas kapal oleh IMO (Resolusi MSC 137 (76) 2002) .....	13
<b>Tabel 2.3</b> Parameter WGS 84 (ITRF, 2008).....	19
<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi SIGMA <i>extended</i> dan SIGMA <i>extended</i> skala 3 meter ...	24
<b>Tabel 3.2</b> Sistem perangkat lunak ( <i>software</i> ) .....	35
<b>Tabel 3.3</b> Data sample pengujian <i>turning circle</i> 20 derajat .....	50
<b>Tabel 4.1</b> Kestabilan kapal berdasarkan evaluasi kriteria <i>sea trial</i> IMO .....	67
<b>Tabel 4.2</b> Kestabilan kapal berdasar nilai parameter model Nomoto .....	68

**----Halaman ini sengaja dikosongkan----**

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

*Maneuverability* kapal adalah kemampuan kapal untuk berubah arah (berbelok atau berputar) pada perairan terbatas atau terbuka. Kapal dikatakan mempunyai kualitas yang baik apabila bermanuver dengan baik pula. Kapal yang mempunyai kemampuan manuver yang baik akan bisa terhindar dari kecelakaan atau tabrakan dengan benda atau objek yang ada di sekitarnya, sehingga menjamin kelancaran, keselamatan kapal baik dalam pengoperasian maupun pelayarannya, terutama di area terbatas atau di dermaga (Li, 2005).

Kapal dikatakan bermanuver dengan baik apabila memenuhi beberapa kriteria yang telah ditentukan oleh *International Maritime Organization* (IMO) dengan acuan panjang kapal. IMO telah membuat sebuah aturan mengenai kriteria - kriteria manuver yang wajib dimiliki oleh setiap kapal melalui beberapa macam pengujian. Kriteria - kriteria tersebut diantaranya adalah radius yang dibutuhkan kapal untuk berputar, waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan satu putaran dan kestabilan kapal pada saat melakukan manuver (IMO Resolusi MSC 137 (76), 2002).

Kapal perang kelas SIGMA *extended* merupakan pengembangan desain oleh tim Konsorsium Kementrian Negara Riset dan Teknologi (KNRT) pada tahun 2012. Kapal tersebut merupakan edisi pengembangan dimensi, keandalan berperang dan kemampuan manuver dari kapal sebelumnya yaitu kapal perang kelas *Ship Integrated Geometric Modularity Approach* (SIGMA) (KNRT, 2012). Prototipe kapal perang kelas SIGMA *extended* dengan skala 1 : 35 dari ukuran kapal aslinya telah dirancang oleh LHI (Laboratorium Hidrodinamika Indonesia - Surabaya).

Pemodelan manuver diperlukan baik dalam penelitian keandalan manuver, merancang sistem kontrol, dan handling simulator kapal (Shi, 2006). Inti dari pemodelan kapal yaitu melakukan estimasi parameter dari model



maneuver kapal tersebut (Shi, 2009), karena banyak parameter tidak bisa diukur secara fisik dengan akurasi yang baik, terutama dalam *real time* (Blanchard, 2007).

Sistem identifikasi diperlukan dalam meningkatkan akurasi model maneuver pada perancangan kapal. Teori identifikasi itu sendiri merupakan seni dan ilmu membangun model matematika dari sistem dinamis berdasarkan data yang diamati pada suatu sistem (Ljung, 1999). Hasil identifikasi dapat meningkatkan dan memvalidasi model yang dilakukan baik secara numerik maupun berbasis eksperimen. Dengan demikian, peran sistem identifikasi pada maneuver kapal merupakan hal yang penting pada tahap evaluasi desain kapal menurut *International Towing Tank Conference* (ITTC, 2005).

Dalam kurun terakhir ini terdapat permintaan peningkatan akurasi dan keandalan yang baik dalam pengendali dinamika gerak kapal. Beberapa variabel yang dikendalikan berupa kecepatan dan arah gerak kapal (Fossen, 2009). Manuver kapal sangat kompleks terdiri dari 6 *Degree of Freedom* (DOF) atau gerak kapal terdiri dari gerak translasi (*surge, sway, heave*) dan gerak rotasi (*roll, pitch, yaw*) sesuai yang dimuat oleh *Society of Naval Architects and Marine Engineers* (SNAME, 1950). Manuver kapal merupakan dinamika nonlinier. Beberapa model dinamika kapal nonlinier menggunakan dua sampai enam derajat kebebasan tersebut. Nomoto melakukan pendekatan dengan cara linierisasi model Davidson dan Schiff 1946, hasil linierisasi berupa satu derajat kebebasan yaitu sudut *yaw*. Model dinamika Nomoto menjelaskan hubungan sudut rudder dengan sudut *yaw* atau *heading* kapal. Model dinamika Nomoto orde dua terdiri parameter  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  dan  $T_3$  (Nomoto, 1957).

Penelitian ini difokuskan untuk identifikasi atau evaluasi kriteria dan memperoleh parameter model dinamika kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter secara Nomoto. Kapal prototipe ini dilengkapi oleh perangkat seperti pengendali, *Global Positioning Sistem* (GPS), *Inertial Measurement Unit* (IMU), *wireless Local Area Network* (LAN), *speed log*, pengkondisi sinyal, sistem penggerak propeller dan penggerak rudder (Im, 2010). Seluruh komponen instrumen terhubung secara serial ke komputer *client* yang berperan sebagai pengendali utama kapal. komputer *client* terintegrasi dengan komputer *server*

yang berada di darat melalui sistem komunikasi *wireless* VPN (Virtual Private Network). Software yang digunakan pada komputer *client* dan komputer *server* yaitu matlab R2013b berbasis GUI (Guide User Interface), terdiri dari sistem monitor dan kontrol. Sistem monitor pada komputer *server* menampilkan visualisasi posisi, sudut rudder, *heading*, dan kecepatan kapal. Sistem kontrol terdiri dari kontrol kecepatan dan arah. Pengendali utama ditanamkan algoritma *turning circle* dan *zig-zag* sesuai aturan IMO, sehingga memungkinkan dilakukannya pengujian secara otomatis.

Pengujian yang akan dilakukan yaitu *turning circle* dengan sudut 35 derajat, sedangkan *zig-zag* dengan sudut 10 dan 20 derajat. Evaluasi kriteria kapal meliputi jarak *advance*, *transfer* dan *tactical diameter* untuk masing – masing pengujian *turning circle*, dan sudut *overshoot* pertama untuk masing – masing pengujian *zig-zag* dan sudut *overshoot* kedua hanya untuk pengujian *zig-zag* 20 derajat (IMO Resolusi MSC 137 (76) 2002).

## **1.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana memperoleh nilai parameter model dinamika secara Nomoto pada prototipe kapal SIGMA *extended*.
2. Bagaimana mengevaluasi kriteria kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter melalui pengujian *turning circle* dan *zig-zag* secara eksperimen.

## **1.3 Tujuan**

Tujuan dari tesis ini adalah mengevaluasi kriteria dan mendapatkan parameter model dinamika secara Nomoto pada kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter.

## **1.4 Manfaat**

Manfaat dari tesis ini adalah hasil evaluasi yang telah dilakukan melalui pengujian secara eksperimen maupun parameter model dapat memberikan informasi apakah kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter sesuai dengan kriteria standar yang diisyaratkan oleh aturan IMO, hal ini

mengindikasikan bahwa perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter mempunyai kemampuan manuver yang baik atau tidak.

### **1.5 Batasan Masalah**

Supaya tujuan penelitian ini lebih fokus maka batasan masalah yang disusun sebagai berikut :

1. Obyek yang diteliti adalah kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter hasil rancangan Laboratorium Hidrodinamika Indonesia - Surabaya.
2. Sistem instrumentasi yang terintegrasi pada kapal dapat merekam informasi kecepatan, posisi (*latitude, longitude*), sudut rudder dan sudut yaw.
3. Kendali sistem penuh (monitor dan kontrol) berada pada komputer *server* sedangkan akusisi data berada pada komputer *client* di kapal.
4. Software yang digunakan yaitu GUI Matlab 2013b.
5. Pengujian secara eksperimen dilakukan pada air yang tenang dengan kecepatan service antara 1 sampai 1,2 m/s.
6. Pengujian manuver yaitu *turning circle* dilakukan dengan sudut rudder 35, 20 dan 10, untuk *zig-zag* sudut rudder 10 dan 20.
7. Mendapatkan parameter model dinamika kapal dilakukan secara Nomoto.

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Kajian Pustaka

Penelitian berbasis eksperimen pada kapal skala sebelumnya pernah dilakukan oleh N. Im & J.H. Seo (2010). Model kapal berupa skala 1 : 100 dari ukuran kapal sebenarnya. Model kapal tersebut difokuskan pada perancangan sistem instrumentasi seperti personal komputer, aktuator dan sensor antara lain GPS dan IMU. Pengujian kapal tersebut dilakukan untuk mengetahui performa kapal antara lain uji *zig-zag* dan *turning circle*. Kapal tersebut menghasilkan performa yang cukup bagus sehingga dapat digunakan pada penelitian selanjutnya yaitu kontrol cerdas pada kapal.

Penelitian yang dilakukan oleh C. Shi, D. Zhao, J. Peng, & C. Shen (2009) menjelaskan tentang cara mengidentifikasi model nonlinier manuver kapal menggunakan Extended Kalman Filter (EKF) pada model nonlinier manuver kapal. Pemodelan gerak horizontal kapal dilakukan dengan penurunan hukum II Newton. Dilakukan penjabaran deret Taylor serta perhitungan parameter kapal  $a_i$ ,  $b_i$ , dan  $c_i$ . Setelah itu dilakukan pengujian kapal tersebut dengan tes *turning-cycle* dan *zig-zag*. Hasil error yang diperoleh pada tes *turning-cycle* untuk advance sebesar 1,9%; transfer sebesar 5%; dan diameter maneuver sebesar – 0,2%. Penelitian yang dilakukan oleh L. Moreira, & C. Guedes Soares (2003) tentang memprediksi model dinamis kapal menggunakan *recursive neural network* (RNN). Model dinamis kapal diperoleh dari menurunkan gerak kinematik dan dinamis menjadi model nonlinier. Sebagai inputan NN antarlain *rudder*, *speed*, *sway* dan *yaw*, sedangkan outputan NN yaitu *sway* dan *yaw*. Hasil yang diperoleh dari pengujian *turning-cycle* dari penelitian ini yaitu NN mempunyai akurasi yang cukup baik untuk simulasi maneuver dengan error sebesar 6% .

Penelitian menggunakan *least square* pada kapal dilakukan oleh Ye Baoyu (2011) yaitu membandingkan hasil estimasi model matematis dengan hasil eksperimen menggunakan *least square* pada penentuan posisi kapal. Hasil yang

diperoleh dari pengujian penentuan posisi menggunakan *least square* dekat dengan perhitungan.

## 2.2 Ukuran Pokok Kapal

Ukuran pokok kapal adalah istilah yang sering digunakan untuk menunjukkan besar atau kecil suatu kapal. Ukuran pokok kapal terdiri dari ukuran memanjang atau membujur, ukuran melintang atau melebar dan ukuran tegak atau vertical.

### 2.2.1 Ukuran Memanjang / Membujur

#### 1. Panjang seluruhnya (*Length Over All* = LOA)

Panjang seluruhnya ialah jarak membujur sebuah kapal dari titik terdepan lenggi haluan kapal sampai ke titik terbelakang buritan kapal, diukur sejajar lunas. Jarak ini merupakan jarak terpanjang dari sebuah kapal yang gunanya sangat penting untuk memperkirakan panjang dermaga yang digunakan sewaktu kapal sandar.

#### 2. Panjang antara garis tegak (*Length Between Perpendiculars* = LBP)

Panjang antara garis tegak ialah panjang kapal dihitung dari garis tegak depan sampai ke garis tegak belakang. Garis tegak depan (*Forward perpendicular*) ialah sebuah garis khayalan yang memotong tegak lurus garis muat perancang kapal dengan linggi depan. Garis tegak belakang (*After perpendicular*) ialah sebuah garis khayalan yang biasanya terletak pada tengah-tengah cakak kemudi atau bagian belakang dari poros kemudi. Panjang antara garis tegak diukur sejajar lunas dan merupakan panjang lambung bebas (*freeboard length*).

#### 3. Panjang sepanjang garis air/muat (*Length on the Load Water Line* = LLWL)

Panjang sepanjang garis air/muat ialah panjang kapal yang diukur dari perpotongan garis air dengan linggi haluan sampai ke titik potong garis air dengan linggi belakang diukur sejajar lunas.

#### 4. Panjang terdaftar (*Registered length*)

Panjang seperti yang tertera dalam sertifikat kapal itu, yaitu dihitung dari ujung terdepan geladak jalan terus teratas sampai garis tegak belakang diukur sejajar lunas.

### 2.2.2 Ukuran Melintang / Melebar

#### 1. Lebar terbesar atau lebar ekstrim (*Extreme breadth*)

Merupakan jarak melintang dari suatu titik terjauh di sebelah kiri sampai ke titik terjauh disebelah kanan badan kapal diukur pada lebar terlebar (tepi pelat kulit sebelah luar badan kapal).

#### 2. Lebar dalam (*Moulded breadth*)

Lebar / jarak melintang kapal dihitung dari tepi dalam pelat kulit kanan sampai tepi dalam pelat kulit kiri, diukur pada bagian kapal yang terlebar.

#### 3. Lebar terdaftar (*Registered breadth*)

Lebar seperti yang tertera di dalam sertifikat kapal itu. Panjangnya sama dengan lebar dalam (*Moulded breadth*).

### 2.2.3 Ukuran Tegak (Vertikal)

#### 1. Sarat kapal

Jarak tegak yang diukur dari titik terendah badan kapal / Lunas kapal sampai garis air.

#### 2. Lambung bebas (*Free board*)

Jarak tegak dari garis air sampai geladak lambung bebas atau garis *deck* (*free board deck or deck line*).

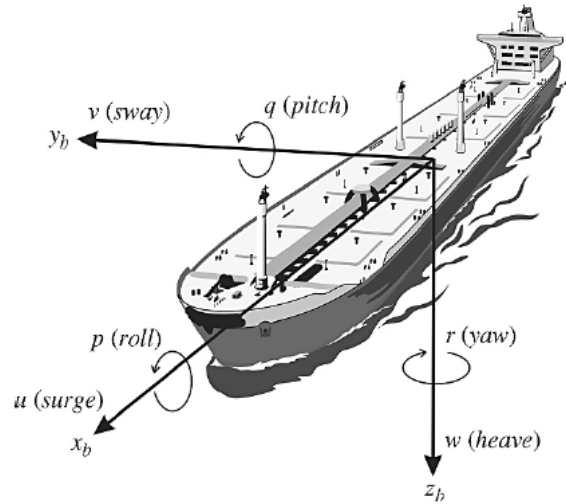
#### 3. Dalam (*depth*)

Jarak tegak yang diukur dari titik terendah badan kapal / lunas kapal sampai ke titik di geladak lambung bebas tersebut. Jadi dalam (*depth*) itu jumlah sarat kapal dalam lambung bebas.

### 2.3 Variabel Gerak Kapal

Model dinamik kapal dirumuskan sebagai suatu *rigid-body* dengan 6 derajat kebebasan. Kapal ini terdiri dari 3 derajat kebebasan terhadap sumbu x,y,z dan 3 derajat kebebasan lainnya mengacu kepada arah rotasi dan orientasi dari kapal. Keenam derajat kebebasan dari kapal biasa disebut sebagai : *Surge*, *Sway*, *Heave*, *Roll*, *Pitch*, *Yaw*. Derajat kebebasan ini juga biasa disebut sebagai komponen gerak. Deskripsi singkat mengenai *surge* merupakan gerak maju

mundur, *sway* merupakan gerak ke samping kiri kanan, *heave* merupakan gerak ke arah atas bawah. Sudut *yaw* merupakan gerak memutar ke samping kiri kanan, *roll* gerak sisi kiri kanan dan *pitch* merupakan gerak mengangguk.



**Gambar 2.1** Standard notasi 6 derajat kebebasan (DOF) pada kapal (SNAME, 1950)

Tabel 2.1 menunjukkan deskripsi setiap derajat kebebasan dan nomenklatur yang sesuai digunakan untuk menjelaskan forces dan moments kapal. Berikut ini adalah notasi standar yang direkomendasikan dalam SNAME (1950).

**Tabel 2.1** Deskripsi notasi dan derajat kebebasan (Fossen, 2011)

DOF	Translation	Forces	Linear velocity	Position
1	surge	$X$	$u$	$x$
2	sway	$Y$	$v$	$y$
3	heave	$Z$	$w$	$z$
DOF	Rotations	Moments	Angular velocity	Angles
4	roll	$K$	$p$	$\phi$
5	pitch	$M$	$q$	$\theta$
6	yaw	$N$	$r$	$\psi$

## 2.4 Model Dinamika Nomoto

Persamaan (2.1) merupakan formulasi koordinat kapal *body fixed*  $O_b$  (Gambar 2).

$$M\dot{v} + N(u_0)v = \tau_\delta \quad (2.1)$$

Dimana  $v = [v \ r]^T$  merupakan vektor kecepatan,  $\tau_\delta$  merupakan gaya hidrodinamika yang ditimbulkan oleh sistem propulsi. Vektor gaya eksternal ditimbulkan oleh sistem propulsi, angin dan gelombang. Pengujian secara eksperimen dilakukan di air yang tenang, hanya terdapat gaya eksternal yang ditimbulkan dari sistem propulsi. Matrix yang menyusun persamaan (2.1) didefinisikan seperti dibawah ini. Total massa matrix  $M$  tersusun oleh *rigid body* dan ditambahkan massa :

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_v & mx_G - Y_r \\ mx_G & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Dimana derifatif hidrodinamika sesuai notasi SNAME (SNAME, 1950). Pada matrix  $N(u_0)$  terdiri dari linier *damping*, *coriolis* dan *centripetal*.

$$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Sesuai model *state space* yaitu :

$$\dot{x} = Ax + b_1\delta \quad (2.4)$$

Menjadi  $x = v = [v \ r]^T$  dan matrix :

$$A = -M^{-1}N, b_1 = M^{-1}b \quad (2.5)$$



Dimana elemen  $m_{ij}$ ,  $n_{ij}$  dan  $b_i$  ( $i=1,2$  and  $j=1,2$ ) didefinisikan persamaan (2.2) dan (2.3).

Dua representasi alternatif dari model sebelumnya (Davidson, 1946), yang diusulkan oleh Nomoto (1957). Model ini diperoleh dengan mengeliminasi kecepatan sway  $v$  dari persamaan (2.1) untuk mendapatkan *transfer function* Nomoto, antara sudut *heading*  $\psi$  dan sudut rudder  $\delta$ , yaitu :

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2.6)$$

Parameter dari *transfer function* (2.6) dengan derivatif hidrodinamik :

$$\begin{aligned} T_1 T_2 &= \frac{\det(M)}{\det(N)} \\ T_1 + T_2 &= \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \\ K &= \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \\ KT_3 &= \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Model tersebut pada umumnya digunakan untuk menganalisis kestabilan kapal dan desain kontrol sudut yaw (*heading*). Usul lainnya (Nomoto, 1957) adalah pendekatan orde satu dengan konstanta waktu  $T = T_1 + T_2 + T_3$  :

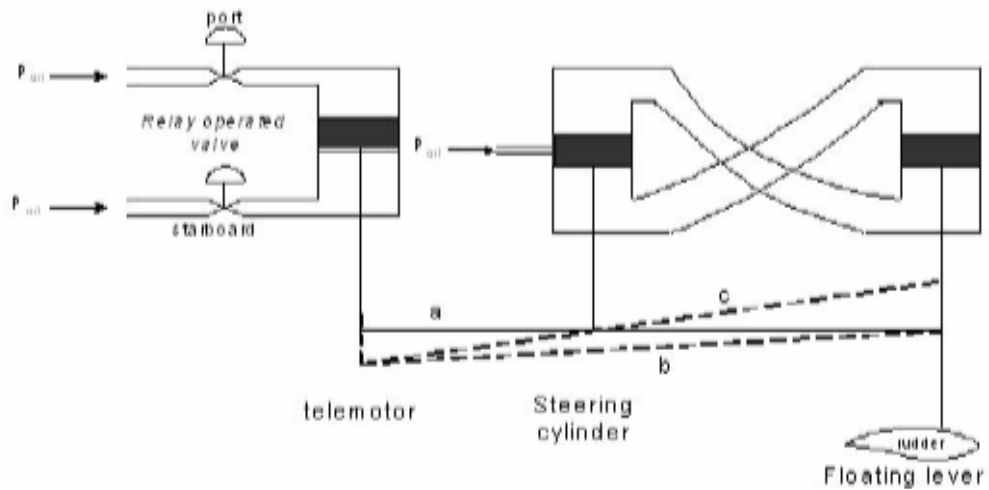
$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K}{(1+Ts)} \quad (2.8)$$

## 2.5 Rudder

*Rudder* merupakan sebuah aktuator pada kapal dimana dalam pengoperasiannya bekerja berdasarkan perintah dari sinyal kontrol. *Rudder* tersebut berfungsi menjaga arah sesuai dengan perintah yang diinginkan. Salah satu *rudder* yang digunakan pada kapal perang kelas SIGMA *extended* adalah

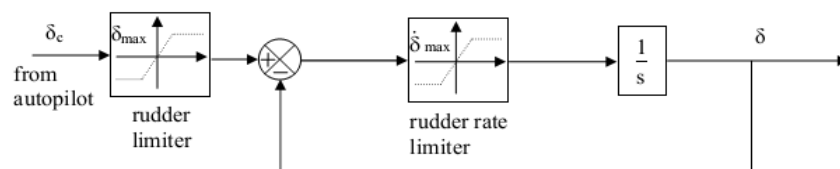
*rudder* dengan jenis Van Amorengen dengan spesifikasi kemampuan kerja antara  $-35^\circ$  sampai dengan  $35^\circ$  dan laju kerja *rudder*  $2,3^\circ - 7^\circ/s$ .

Pada Gambar 2.2 dapat dijelaskan mengenai pengoperasian dari *rudder* Van Amorengen. Dapat dijelaskan pada posisi (a) akan memberikan pengaruh pada *port* (b) Hal ini dikarenakan adanya perubahan tekanan pada *port* yang lebih tinggi sehingga memungkinkan terjadinya bukaan *valve* pada *port* (b), dengan terjadinya bukaan *valve* maka *valve* silinder kemudi terbuka dan *rudder* berada pada posisi (c) seperti pada Gambar dan berakibat bukaan *valve* pada *starboard* akan terbuka dan sebaliknya (Fossen, 1994).



**Gambar 2.2** Sistem Kemudi Van Amorengen (Fossen, 1994)

Pada tahun 1982, simulasi yang dilakukan oleh Van Amorengen mengusulkan dalam penggunaan representasi sederhana dari diagram blok pada Gambar 2.3 Umumnya, sudut *rudder* dan laju *limiter rudder* berada pada rentang  $\delta_{\max} = 35^\circ$  dan  $2,3^\circ/s \leq \dot{\delta}_{\max} < 7^\circ/s$  untuk kebanyakan kapal komersial.



**Gambar 2.3** Diagram blok kendali rudder (Fossen, 1994)

## 2.6 Propeller

Dalam teori dasar hambatan dan propulsi, baling-baling kapal diibaratkan sekrup pendorong, semakin besar ulir atau *pitch*nya semakin cepat pula kapal bergerak maju. Dengan berputarnya baling-baling maka karenanya akan memukul air dan akibatnya kapal akan bergerak maju atau mundur. Jumlah baling-baling kapal itu bermacam-macam antara lain:

1. Baling-baling tunggal dikapal kebanyakan menggunakan baling-baling putar kanan, artinya jika mesin/baling-baling maju maka baling-baling akan berputar searah dengan jarum jam, begitu sebaliknya jika kapal/mesin mundur.
2. Pada umumnya adalah baling-baling ganda putar luar (*out turning propeller*) maksudnya adalah baling-baling kanan putar kanan dan baling-baling kiri putar kiri.
3. Kedudukan tiga baling-baling itu terletak/susunan satu pada masing – masing sisinya (sisi kanan putar kanan dan sisi kiri putar kiri) dan satu lagi tepat di belakang kemudi (ditengah-tengah) baling-baling putar kanan.
4. Pada baling-baling empat ini sistim putarnya adalah sistim luar artinya dua baling-baling sebelah kanan putar kanan dan dua baling-baling kiri putar kiri.

Propeller yang digunakan pada kapal perang kelas SIGMA skala 3 meter adalah jenis propeller ganda, dimana kedua propeller bersamaan berputar. Propeller kiri bergerak ke arah kiri dan propeller kanan bergerak ke arah kanan.

## 2.7 Standard Manuver Kapal

Dalam bermanuver dari sebuah kapal, prosedur yang digunakan sebagai acuan berdasarkan standar kemampuan kapal yang telah direkomendasikan oleh *International Maritime Organization* (IMO) yakni pada resolusi MSC.137(76) mengenai standar kemampuan manuver kapal.

Mengacu pada penjabaran dari resolusi tersebut sesuai yang direkomendasikan dari IMO bahwa aturan standar yang dimaksud berdasarkan atas pengertian bahwa kemampuan manuver kapal dapat dievaluasi

berdasarkan karakteristik dari pengujian manuver kapal. IMO telah merekomendasikan beberapa kriteria standar untuk manuverabilitas kapal seperti pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Standar manuverabilitas kapal oleh IMO (Resolusi MSC 137 (76) 2002)

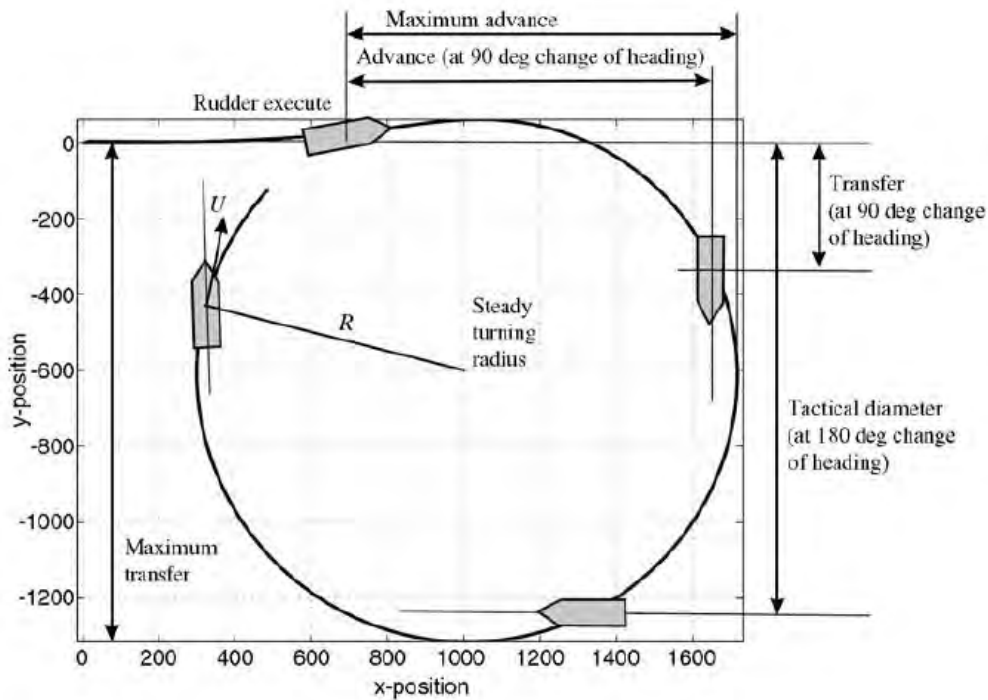
<i>Ability</i>	<i>Test</i>	<i>Criteria</i>
<i>Turning ability</i>	<i>Turning test with max.</i>	<i>Advance</i> $< 4,5 L$
	<i>Rudder Angle (35 deg.)</i>	<i>Tactical Diameter</i> $< 5,0 L$
<i>Initial turning ability</i>	$10^0 / 10^0$ Z-test	<i>Distance ship run before 2<sup>nd</sup> rudder execution</i> $< 2,5 L$
<i>Stopping ability</i>	<i>Stopping test with full astern</i>	<i>Track reach</i> $< 15 L$
<i>Course-keeping and yaw-checking ability</i>	$10^0 / 10^0$ Z-test	<i>1<sup>st</sup> Overshoot</i> $< 10^0 \quad (L/U < 10)$ $< (5 + 0,5 (L/U))^0 \quad (10s < L/U < 30s)$ $< 20^0 \quad (30s < L/U)$ <i>2nd Overshoot</i> $< 25^0 \quad (L/U < 10s)$ $< (17,5 + 0,75(L/U))^0 \quad (10s < L/U < 30s)$ $< 40^0 \quad (30s < L/U)$
	$20^0 / 20^0$ Z-test	<i>1<sup>st</sup> Overshoot</i> $< 10^0 \quad (L/U < 10)$

Dimana manuver yang dipergunakan dalam percobaan mengikuti rekomendasi dari *maneuvering trial code* ITTC (1975) dan IMO (Resolusi MSC 137 (76) 2002). Standar pengujian yang diperlukan dalam manuver kapal yang dinyatakan pada IMO resolution MSC 137 (76) (2002) antara lain :

### 2.7.1 *Turning Circle*

Uji *turning circle*, dimulai dari pergerakan lurus dengan laju konstan, *rudder* dihidupkan dengan sudut *rudder* maksimum ke  $\delta$  maksimum (sudut

kemudi maksimum) dan ditahan pada sudut tersebut sampai kapal telah melakukan uji *circle* paling sedikit sebesar  $540^\circ$ . Pengujian dilakukan untuk bagian *portside* dan *starboard*. Informasi yang diperoleh dari manuver ini umumnya menggunakan GPS atau alat penghitung posisi.



**Gambar 2.4** Prosedur *turning circle* (Fossen, 2011)

Berdasarkan parameter yang digunakan untuk mendefinisikan kinerja kapal pada saat berputar adalah :

- Drift Angel* adalah sudut antara haluan kapal dan arah gerakan. Sudut tersebut bervariasi sepanjang kapal.
- Advanced*, merupakan jarak dari pelaksanaan awal ke sumbu x pada kapal ketika telah berbelok  $90^\circ$ .
- The Tactical Diameter*, adalah merupakan jarak dari jalur awal ke sumbu x pada kapal ketika telah berbelok  $180^\circ$ .
- The Diameter of The Steady Turning circle*, adalah diameter dari lingkaran yang terus menerus berputar. Kondisi tetap biasanya dihubungkan pada beberapa titik antara perubahan  $90^\circ$  dan  $180^\circ$  dari perubahan posisi.

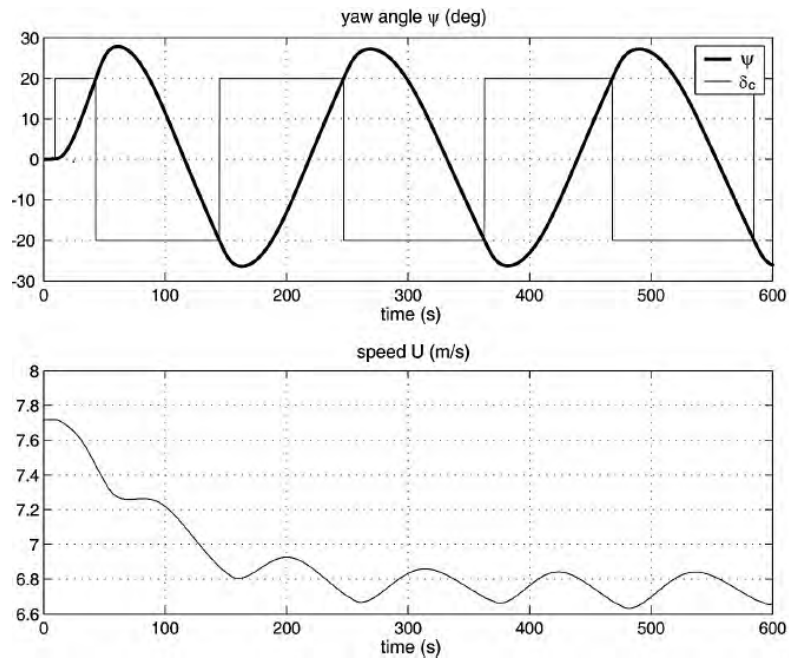
*Turning cycle* manuver harus dilakukan pada kedua bagian sisi kapal dengan  $30^0$  atau sudut maksimum kemudi yang diperbolehkan pada uji kecepatan. Informasi penting yang akan diperoleh dari manuver ini adalah *tactical diameter*, *advance*, and *transfer* sesuai pada Gambar 2.4.

### 2.7.2 Zig-Zag

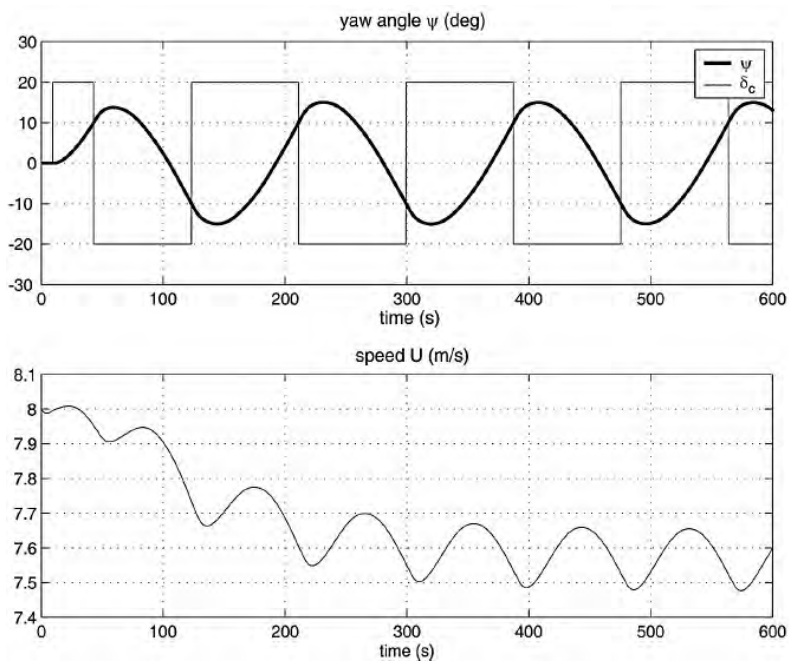
*Pengujian zig-zag* diusulkan oleh Kempf (1932). Uji *zig-zag* manuver ini telah ditetapkan menjadi standar pengujian manuver kapal oleh International Towing Tank Conference (ITTC) pada tahun 1963. Uji *zig-zag* dilakukan untuk kedua bagian yakni *starboard* dan *portside* dengan menentukan sudut kemudi. Dimana terdapat dua jenis *zig-zag* untuk tes standar, yaitu dengan menggunakan sudut *heading* sebesar  $10^0/10^0$  dan  $20^0/20^0$ .

Standar manuver serta terminology dari manuver *zig-zag* 10 derajat dapat didefinisikan sebagai berikut :

1. Manuver *zig-zag* dengan sudut kemudi 10 derajat dilaksanakan dengan prosedur sebagai berikut:
  - a. Setelah mencapai *steady approach* dengan percepatan *yawing* sebesar nol, maka kontrol dibelokkan sebesar 10 derajat ke arah *starboard* atau *portside* untuk eksekusi pertama.
  - b. Pada saat sudut *heading* berubah 10 derajat dari sudut *heading* semula , maka kemudi dibelokkan berlawanan untuk eksekusi kedua.
  - c. Setelah kemudi dibelokkan maka kapal akan terus berbelok kearah semula dengan mengalami penurunan kecepatan belok. Untuk mengetahui respon kapal terhadap kontrol maka selanjutnya kapal harus berbelok kearah berlawanan. Ketika kapal sudah mencapai sudut *heading* 10 derajat kearah awal maka selanjutnya kemudi dilawan sebaliknya kearah 10 derajat sebaliknya untuk eksekusi ketiga.
2. Sudut *overshoot* pertama adalah penambahan dari deviasi sudut *heading* pada *zig-zag* manuver di eksekusi kedua.
3. Sudut *overshoot* kedua adalah penambahan deviasi sudut *heading* pada *zig-zag* manuver di eksekusi ketiga.



**Gambar 2.5** Pengujian *zig-zag* 20 derajat pada kapal kontainer (Fossen, 2011)



**Gambar 2.6** Pengujian *zig-zag* 10 derajat pada kapal perang (Fossen, 2011)

Dalam menganalisa performansi manuver kapal maka pengujian manuver baik ke arah *portside* maupun *starboard* harus dilakukan dengan kondisi sebagai berikut :

1. Pengujian dilakukan pada perairan dalam atau perairan tak terbatas.

2. Kondisi perairan atau lingkungan yang tenang.
3. Kondisi sarat penuh (sesuai dengan garis air pada musim panas).
4. *Steady approach* pada saat *speed test*.

## 2.8 Froude Number

Froude Number adalah sebuah bilangan tak bersatuan yang digunakan untuk mengukur resistensi dari sebuah benda yang bergerak melalui air, dan membandingkan benda dengan ukuran yang berbeda. Untuk menyatakan besarnya kecepatan model dapat menggunakan *Froude's Number* ( $F_n$ ), dimana  $F_n$  dipengaruhi oleh kecepatan ( $v$ ), gaya gravitasi ( $g$ ) dan panjang kapal ( $L$ ). Formula  $F_n$  dinyatakan pada persamaan berikut :

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (2.9)$$

Dari penjelasan diatas maka dengan diketahui  $F_n$  kapal skala penuh, maka dapat diketahui juga besarnya  $F_n$  skala model.

$$\frac{v_{\text{kapal skala penuh}}}{\sqrt{g \cdot L_{\text{kapal skala penuh}}}} = \frac{v_{\text{kapal prototipe}}}{\sqrt{g \cdot L_{\text{kapal prototipe}}}} \quad (2.10)$$

Atau dengan kata lain penjelasan diatas dengan diketahui kecepatan kapal skala penuh, panjang kapal penuh, gaya gravitasi dan panjang kapal skala model, maka kecepatan kapal skala model dapat diketahui.

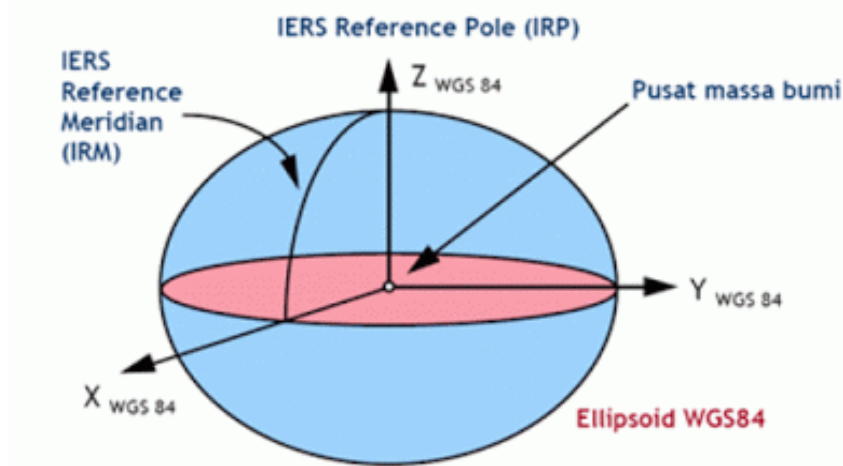
## 2.9 Formula Vincenty

GPS adalah singkatan dari *Global Positioning System* yang merupakan sistem untuk menentukan posisi dan navigasi secara global dengan menggunakan satelit. Pada dasarnya penentuan posisi dengan GPS adalah pengukuran jarak secara bersama ke beberapa satelit (yang koordinatnya telah diketahui) sekaligus. Untuk menentukan suatu titik di bumi, *receiver* setidaknya membutuhkan 4 satelit



yang dapat ditangkap sinyalnya dengan baik. Secara *default* posisi atau koordinat yang diperoleh bereferensi ke global datum yaitu *World Geodetic System* (WGS). Berikut merupakan jenis-jenis sistem referensi yang biasa dipakai dalam pendeskripsian posisi :

1. CIS (*Conventional Inertial System*) ialah referensi koordinat yang biasa digunakan untuk pendeskripsian posisi dan pergerakan satelit. Sifatnya geosentrik dan terikat langit.
2. CTS (*Conventional Terrestrial System*) ialah sistem referensi koordinat yang biasa digunakan untuk menyatakan posisi di permukaan bumi. Sifatnya geosentrik dan terikat bumi.



**Gambar 2.7** Sistem koordinat WGS 84 ([geographicsystem.blogspot.com](http://geographicsystem.blogspot.com))

Salah satu realisasi dari CTS adalah WGS 84 (*World Geodetic System 84*). WGS 84 adalah sistem yang saat ini digunakan oleh sistem navigasi GPS. WGS 84 pada prinsipnya adalah sistem koordinat CTS yang didefinisikan, direalisasikan dan dipantau oleh NIMA (*National Imagery and Mapping*) Amerika Serikat.

Pendefinisian sistem koordinatnya mengikuti kriteria yang ditetapkan oleh IERS pada Gambar ( *International Earth Rotation Service* ) yaitu sebagai berikut :

1. Titik Nol koordinat terdapat pada pusat massa bumi ( Geosentrik ). Dimana massa bumi mencakup lautan dan juga atmosfer.
2. Skalanya adalah kerangka bumi lokal dalam terminologi relativitas dari gravitasi.

3. Orientasi awal dari sumbu – sumbu koordinatnya adalah didefinisikan oleh orientasi *Bureau International de l'Heure ( BIH )* epok 1984.
4. Sumbu Z mengarah ke IERS reference pole. Sumbu X nya berada dibidang ekuator dan pada bidang *IERS Reference Meridian ( IRM )*. Sumbu Y tegak lurus terhadap sumbu X dan sumbu Z, dan membentuk sistem koordinat tangan kanan ( *Right-Handed System* ).
5. Evolusi waktu dari orientasinya tidak mempunyai residu pada rotasi global terhadap kerak bumi. Berikut ini merupakan parameter WGS 84 :

**Tabel 2.3** Parameter WGS 84 (ITRF, 2008)

Parameter	Notasi	Nilai
Sumbu Panjang	a	6378137 m
Penggepengan	f	1/298.257223563
Kecepatan Sudut Bumi	$\omega$	$7292115.0 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
Konstanta Gravitasi		
Bumi (termasuk massa atmosfernya)	GM	$3986004.418 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$

WGS 84 direalisasikan dengan menggunakan koordinat dan sistem penjejak (*Tracking Stations*) yang didistribusikan secara global serta memiliki ketelitian absolut sekitar 2 meter. Dengan memanfaatkan teknologi GPS dalam melakukan penentuan posisi, maka secara tidak langsung posisi titik-titik yang ditentukan nilainya tersebut akan berada pada satu sistem referensi WGS 84. Formula vincenty menggunakan referensi WGS 84 dalam aplikasinya.

## 2.10 Software Matlab

Matlab adalah salah satu bahasa pemrograman bahasa tingkat tinggi untuk komputansi teknik interaktif yang mengintegrasikan komputansi dan visualisasi. Matlab dikembangkan oleh MathWorks, yang pada awalnya dibuat untuk memberikan kemudahan mengakses data matrik pada proyek LINPACK dan EISPACK. Saat ini Matlab memiliki ratusan fungsi yang dapat digunakan sebagai *problem solver* mulai dari sederhana hingga masalah yang kompleks dari berbagai

disiplin ilmu.



**Gambar 2.8** *Software Matlab 2013b*  
(<http://www.mathworks.com/products/matlab/>)

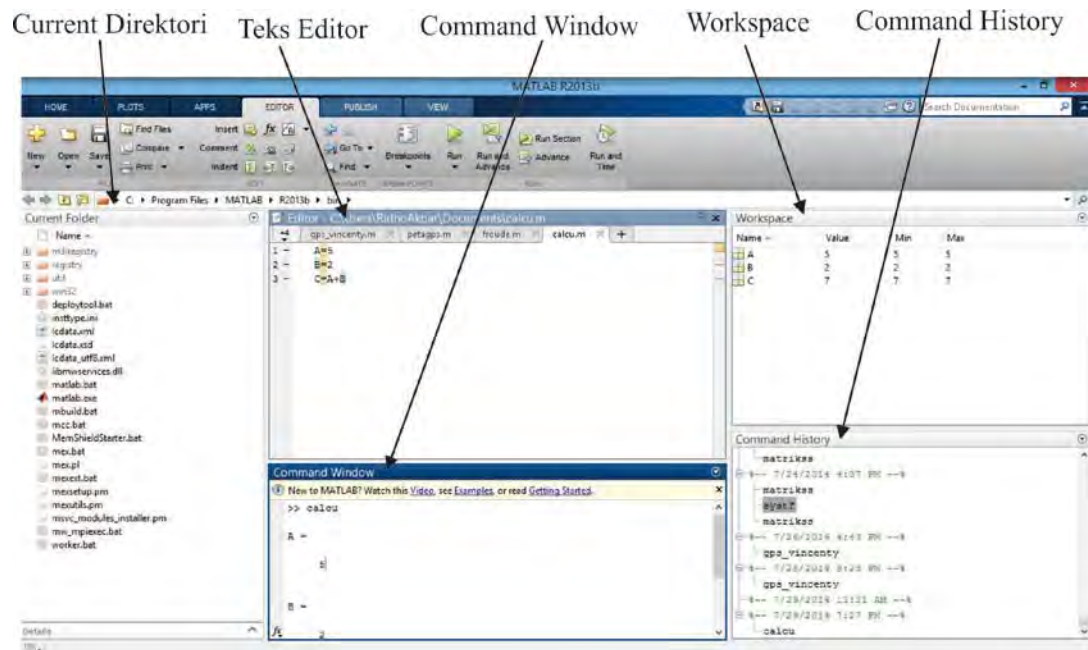
Secara umum, Matlab digunakan dalam hal :

- Matematika dan komputansi
- Pengembangan alogaritma
- Akusisi data
- Pemodelan, simulasi dan pembuatan prototipe
- Analisa data, eksplorasi dan visualisasi
- Grafik keilmuan dan bidang rekayasa
- Pengembangan aplikasi, termasuk pembuatan GUI (Guide User

Interface)

Inti dari Matlab adalah operasi matriks yang merupakan sekumpulan fungsi-fungsi yang dapat dipanggil dan dieksekusi. Fungsi - fungsi Matlab (m-file) tersebut dibagi berdasarkan kegunaan yang dikelompokkan di dalam toolbox pada Matlab. Oleh karena itu, terlebih dahulu perlu pemahaman matematis terutama pada operasi vektor dan matriks.

Pada saat membuka program Matlab, maka akan muncul dekstop Matlab terdiri dari GUI untuk mengelola file, variabel dan aplikasi lainnya yang berhubungan dengan Matlab. Gambar dibawah ini menunjukkan tampilan dekstop default Matlab, pengaturan alat dan dokumen dapat disesuaikan dengan keperluan.



**Gambar 2.9** Menu editor Matlab

Beberapa tool yang terdapat pada dekstop Matlab antara lain :

- Current Folder

Window ini menampilkan isi dari direktori kerja saat menggunakan matlab. Kita dapat mengganti direktori ini sesuai dengan tempat direktori kerja yang diinginkan. Default dari alamat direktori berada dalam folder “C:\Program Files\MATLAB\R2013b\bin”.

- Command Window

Window ini adalah window utama dari Matlab. Disini adalah tempat untuk menjalankan fungsi, mendeklarasikan variable, menjalankan proses-proses , serta melihat isi variable. Perintah dapat diubah sesuai dengan kebutuhan untuk menjalankannya, eksekusi program dapat dilakukan dengan menekan tombol enter.

- Workspace

Workspace berfungsi untuk menampilkan seluruh variabel-variabel yang sedang aktif pada saat pemakaian Matlab. Apabila variabel berupa data matriks berukuran besar maka user dapat melihat isi dari seluruh data dengan melakukan double klik pada variabel tersebut. Matlab secara otomatis akan menampilkan window “array editor” yang berisikan data pada setiap variabel yang dipilih user.

- Teks Editor

Teks editor digunakan untuk membuat dan menjalankan m-file.

- Command History

Window ini berfungsi untuk menyimpan perintah-perintah apa saja yang sebelumnya dilakukan oleh pengguna terhadap matlab, sehingga perintah yang telah dijalankan dapat dilihat, dicari serta menyalin dan mengeksekusi perintah yang dipilih, termasuk m-file.

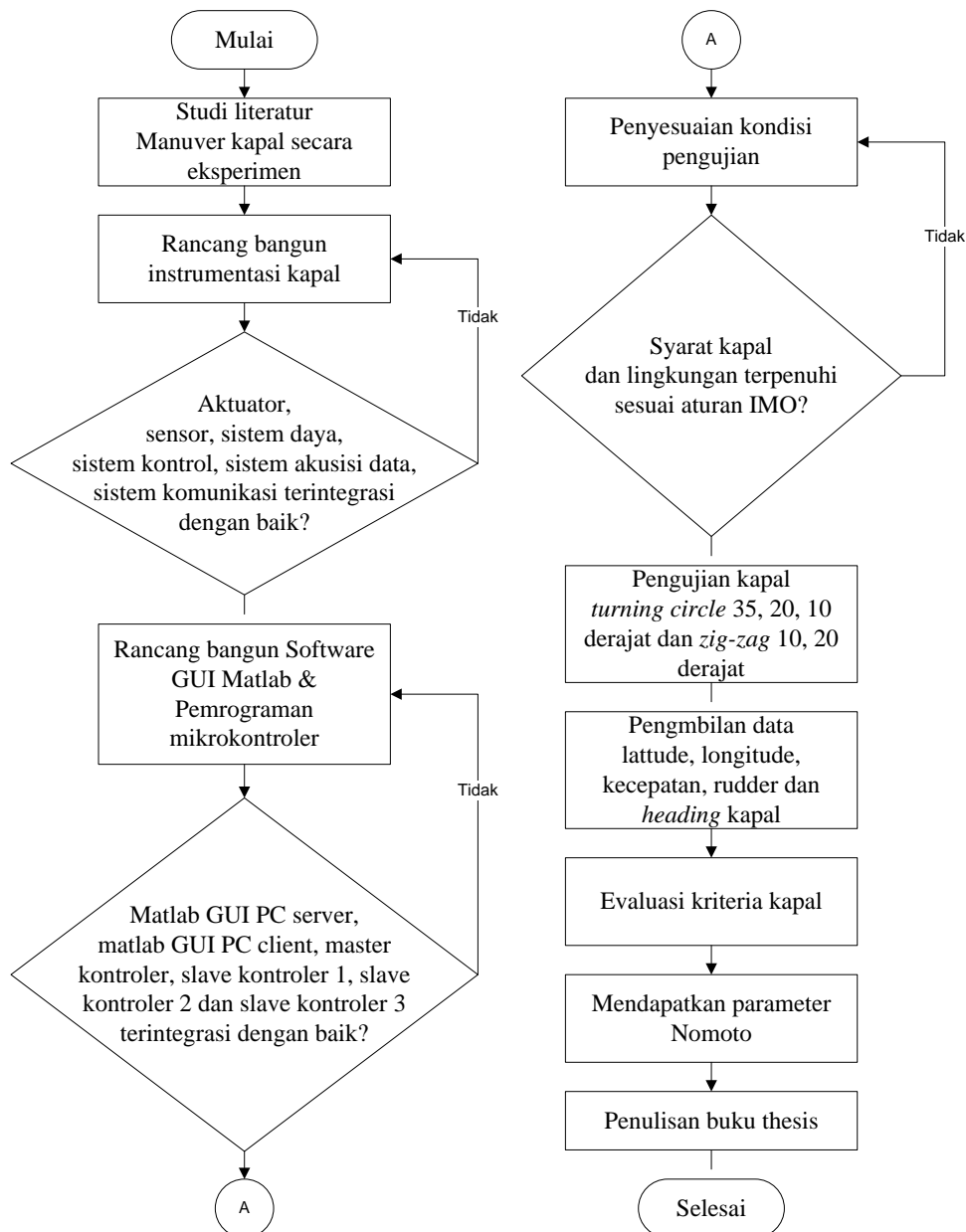
- Tombol Start dan Launch Pad

Tombol *start* memudahkan akses ke *tool*, *demo* dan dokumentasi. Untuk melihat pilihan cukup dengan menekan tombol *start* yang ada.

### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

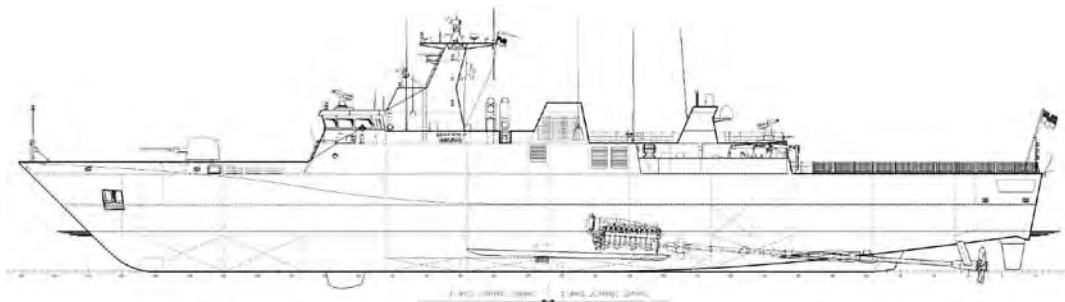
Pada bab ini akan dijelaskan tahapan pengerjaan tesis, antara lain perancangan perangkat keras (*hardware*), perangkat lunak (*software*), pengujian kapal, skenario pengambilan data, evaluasi kriteria dan perhitungan parameter kapal yang ditunjukkan pada diagram alir Gambar 3.1 berikut ini.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.1 Kapal SIGMA *Extended* Skala 3 Meter

Kapal korvert kelas SIGMA merupakan salah satu jenis kapal perang yang menjadi kekuatan TNI AL. Kapal korvert kelas SIGMA mempunyai fungsi dasar dari kapal ini adalah Patroli maritim Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), Penggetar, Pencarian dan penyelamatan (SAR) dan anti kapal selam. Kapal ini dirancang untuk menerima sistem modul di berbagai area, menyebabkan kapal ini mempunyai banyak keunggulan dibanding kapal perang dari jenis korvet lainnya. Oleh karena itu tim konsorsium KNRT mengembangkan dimensi, kemampuan berperang dan keandalan manuver. Desain kapal perang kelas SIGMA *extended* yang dirancang oleh konsorsium KNRT seperti pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** *Linesplan* Kapal SIGMA *extended*

LHI mentransformasikan desain SIGMA *extended* Gambar 3.2 ke dalam sebuah prototipe dengan perbandingan skala 1 : 35. Gambaran informasi spesifikasi SIGMA *extended* dan SIGMA *extended* skala 3 meter seperti pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Spesifikasi SIGMA *extended* dan SIGMA *extended* skala 3 meter

	SIGMA <i>extended</i>	SIGMA <i>extended</i> skala 3 meter
Perbandingan skala	1	35
Desain kecepatan	30 (knot)	2,6 (m/s)
LLWL	101,07 (meter)	2,86 (meter)
LOA	106 (meter)	3,03 (meter)
B	14 (meter)	0,4 (meter)
Depth	8,75 (meter)	0,25 (meter)
Draft	3,7 (meter)	0,11 (meter)

Prototipe kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter yang dibuat oleh LHI ditunjukkan pada Gambar 3.3. Kapal ini didesain menggunakan mesin penggerak ganda untuk memutar propeller. Propeler kiri berputar berlawanan jarum jam, sedangkan propeller kanan berputar searah jarum jam. Dilengkapi dengan rudder ganda, masing – masing dapat bergerak dengan sudut maksimal 35 dan -35 derajat.



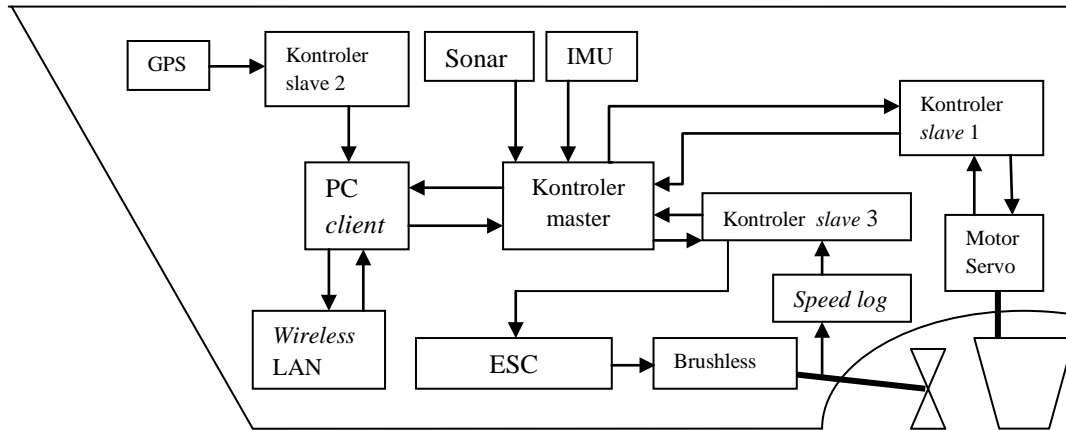
**Gambar 3.3** Kapal SIGMA *extended* skala 3 meter

### **3.2 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)**

Rancang bangun kapal perang kelas SIGMA *extended* terbagi menjadi dua sub bab yaitu perancangan perangkat keras atau *hardware* dan perangkat lunak atau *software*. Pada sub bab ini membahas perangkat keras yang terdiri dari sensor, aktuator, pengendali dan komponen pendukung lainnya. Sensor yang digunakan antara lain GPS untuk mengetahui posisi berupa lintang dan bujur, sonar untuk mengetahui jarak kapal dengan halangan yang berada disekitarnya, IMU merupakan sebuah sensor untuk mengetahui derajat kebebasan pada kapal umumnya *surge*, *sway*, *yaw*, *pitch*, *roll* dan *heave*, *speed log* untuk mengetahui rpm propeller dan sensor rudder untuk mengetahui pergerakan sudut rudder. Aktuator terdiri dari penggerak propeller dan penggerak rudder. Sebagai pengendali terdiri dari Mikrokontroler *slave 1*, *slave 2*, *slave 3* dan Mikrokontroler *master*. Komputer *client* berperan sebagai kontrol utama kapal dan komputer *server* berperan sebagai *remote*. Komponen pendukung lainnya diantaranya baterai sebagai catu daya sistem instrumentasi dan sistem



komunikasi sebagai media transmisi atau pertukaran data. Perancangan perangkat keras kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Perancangan *hardware* instrumentasi

### 3.2.1 Sistem Daya

Kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter dirancang menggunakan sistem instrumentasi dan penggerak yang berenergi listrik. Hal ini mempunyai arti bahwa kapasitas penyimpanan daya listrik yang digunakan harus mencukupi untuk kebutuhan berlayar. Untuk itu pemilihan penyimpanan daya listrik perlu diperhitungkan. Kapal model ini menggunakan baterai tipe *litium polymer* atau dikenal sebagai baterai LiPo, biasanya kapasitas penyimpanan baterai dalam satuan mah (*mili volt ampere*). Baterai LiPo tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Dengan metode ini baterai LiPo dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Selain itu baterai LiPo memiliki kapasitas penyimpanan energi listrik yang besar dibanding baterai jenis NiCad atau NiMH. Diluar dari kelebihan arsitektur baterai LiPo, terdapat juga kekurangan yaitu lemahnya aliran pertukaran ion yang terjadi melalui elektrolit polimer kering. Hal ini menyebabkan penurunan pada charging dan discharging rate.

Kapal model ini menggunakan baterai LiPo dengan 3 kapasitas yang berbeda yaitu 7,4 volt kapasitas 2200 mah digunakan untuk sistem sensor dan pengendali, 11,1 volt 5000 mah digunakan sebagai supply pada motor servo untuk rudder dan pompa pendingin motor dan 22,2 volt 12.000 mah digunakan untuk penggerak utama dua baling-baling propeller. Baterai 22,2 volt 12.000 mah yang terinstalasi pada kapal seperti pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Baterai dan *charger*

### 3.2.2 Sensor dan Aktuator

Pada subbab ini akan dijelaskan lebih detail deskripsi sensor dan aktuator yang digunakan pada rancang bangun kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter antara lain :

- GPS (*Global Position System*)

GPS pada penelitian ini adalah sistem untuk menentukan letak atau posisi kapal ketika pengujian berlangsung dengan bantuan penyelarasan (*synchronization*) sinyal satelit. GPS yang digunakan merupakan produk Ublox LEA-6H. Sistem ini menggunakan 24 satelit yang mengirimkan sinyal gelombang mikro. Sinyal ini diterima oleh antenna GPS yang terletak dibagian tertinggi pada kapal. Informasi yang dapat diambil dari GPS ini digunakan antara lain dari posisi, kecepatan, ketinggian, waktu, tanggal, dan lain lain. Baris kode yang digunakan dalam pengambilan informasi \$GPRMC di-*decode*-kan dengan cara sebagai berikut :

\$GP *First code for Global Positioning*

RMC *Recommended Minimum sentence C*

123519 *Fix taken at 12:35:19 UTC*

A Status A=*active* or V=*Void*.

4807.038,N *Latitude 48 deg 07.038' N*

01131.000,E *Longitude 11 deg 31.000' E*

022.4 *Speed over the ground in knots*

084.4 *Track angle in degrees True*

230394 *Date - 23rd of March 1994*

003.1,W *Magnetic Variation*

\*6A *The checksum data, always begins with \**

Data-data tersebut dipisah kan oleh tanda koma "," yang akan kita jadi kan sebagai pembatas tiap-tiap data. Data-data yang telah selesai di-*decode* kan kemudian akan diuraikan menjadi paket informasi. Koneksi dari Modul *Receiver* ke Mikrokontroler yang digunakan yaitu komunikasi serial dengan *Baudrate* 38400). Dari kalibrasi yang dilakukan GPS yang digunakan pada penelitian ini mempunyai ketelitian 2.2 meter. GPS yang terpasang pada kapal prototipe ditunjukkan pada Gambar 3.6 (a), sedangkan antenna GPS ditunjukkan pada Gambar 3.6 (b).



**Gambar 3.6** (a) Modul GPS ublox (b) Antena GPS

- IMU (*Inertial Measurement Unit*)

IMU digunakan sebagai alat pengukuran gaya inersia atau variabel dinamika yang terjadi pada kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter. IMU yang digunakan terdiri dari sensor akselerometer ADXL345 3 aksis, sensor gyroskop ITG 3200 3 aksis, sensor magnetometer HMC5883L 3 aksis dan sensor barometer BMP085. Pada Sensor IMU diinstalasi di titik berat kapal supaya memperoleh hasil pembacaan gaya inersia kapal yang baik. Pemasangan sensor IMU pada kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter ditunjukkan oleh Gambar 3.7.

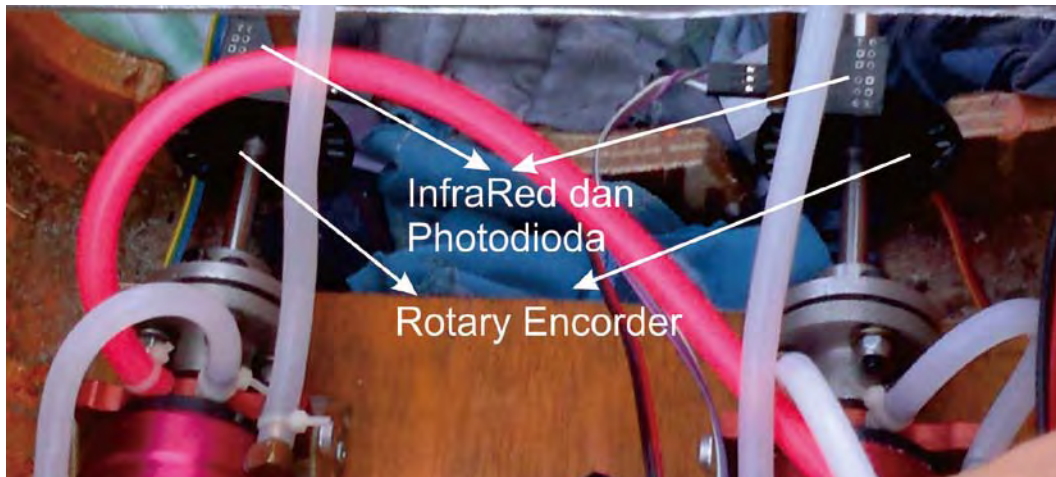


**Gambar 3.7** Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*)

- *Speed Log*

*Speed log* pada kapal merupakan alat untuk mengetahui informasi rpm, kecepatan maupun informasi lainnya yang berkaitan dengan kecepatan kapal. *Speed log* yang dimaksud pada penelitian ini merupakan *rotary encoder* yang sengaja diletakkan pada shaft propeller, berguna mengetahui rpm propeller kapal. *Rotary encoder* adalah device elektromekanik yang dapat memonitor gerakan dan posisi. *Rotary encoder* umumnya menggunakan sensor optik untuk menghasilkan serial pulsa yang dapat diartikan menjadi gerakan, posisi, dan arah. Sehingga posisi sudut suatu poros benda berputar dapat diolah menjadi informasi berupa kode digital oleh rotary encoder untuk diteruskan oleh rangkaian kendali. *Rotary encoder* tersusun dari suatu piringan tipis yang memiliki lubang-lubang pada bagian lingkaran piringan.

LED infra merah ditempatkan pada salah satu sisi piringan sehingga cahaya akan menuju ke piringan. Di sisi yang lain suatu photodiode diletakkan sehingga photodiode ini dapat mendeteksi cahaya dari LED infra merah yang berseberangan. Piringan tipis tadi dikopel dengan poros motor, atau *device* berputar lainnya yang ingin kita ketahui posisinya, sehingga ketika motor berputar piringan juga akan ikut berputar. Apabila posisi piringan mengakibatkan cahaya dari LED infra merah dapat mencapai photodiode melalui lubang-lubang yang ada, maka photodiode akan mengalami saturasi dan akan menghasilkan suatu pulsa gelombang persegi. Gambar 3.8 menunjukkan penyusun *rotary encoder*. Semakin banyak deretan pulsa yang dihasilkan pada satu putaran menentukan akurasi *rotary encoder* tersebut.



**Gambar 3.8** Pemasangan *speed log* pada prototipe kapal SIGMA *extended*

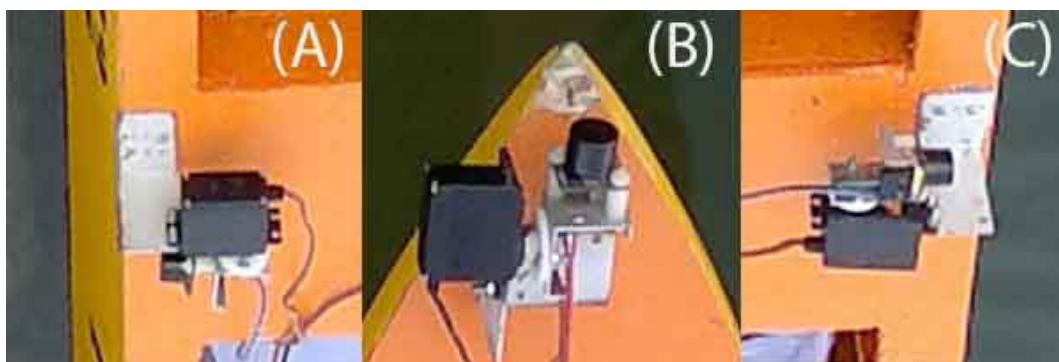
Dengan rumus pembacaan rpm dari jumlah pulsa yang dihasilkan yaitu :

$$rpm = n \cdot \frac{60}{k} \quad (3.1)$$

Notasi  $n$  merupakan jumlah pulsa yang dihasilkan,  $k$  adalah jumlah lubang *rotary encoder*. *Rotary encoder* yang digunakan pada kapal model mempunyai satu jumlah lubang. Hal ini dikarenakan sensitifitas LED infra merah dan photodiode yang digunakan tidak begitu baik.

- Sonar

Sonar merupakan sensor yang dapat mengetahui jarak antara sensor dengan halangan didepannya. Terdapat 3 sensor sonar pada kapal ini yang terletak di sebelah kiri, depan dan kanan sisi kapal. Sensor tersebut berfungsi membaca jarak kapal prototipe dengan halangan disekitarnya, mampu mendeteksi halangan hingga 1000 cm. Mempunyai kepresisian pembacaan 1 cm. Pemasangan sensor sonar ini mempunyai tujuan kapal prototipe dapat menghindari tabrakan dan dapat bersandar di pelabuhan secara otomatis pada penelitian selanjutnya.



**Gambar 3.9** (a) Sensor sonar bagian kiri kapal (b) Sensor sonar bagian depan kapal (c) Sensor sonar bagian kanan kapal

- Motor Servo

Motor servo adalah sebuah motor dengan sistem *closed feedback* di mana posisi dari motor akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada di dalam motor servo. Motor servo yang digunakan sebagai penggerak rudder kapal prototipe yaitu HS-805MG, mempunyai torsi 24,7 kg-cm dan catu daya 6 volt. Penggunaan motor servo sebagai penggerak rudder sangat sesuai, karena pada prinsipnya motor ini bergerak berdasarkan besaran sudut melalui pengaturan PWM yang diberikan oleh pengendali. Mikrokontroler *slave* 1 mengatur besarnya PWM yang diberikan, sehingga kecepatan gerak dan sudut motor servo ini dapat diatur. Motor servo sebagai penggerak rudder pada kapal prototipe ini diatur sesuai dengan aturan Van Amoegan yaitu dapat bergerak 7 derajat per detik. Motor servo yang terpasang pada poros rudder ditunjukkan pada Gambar 3.10.

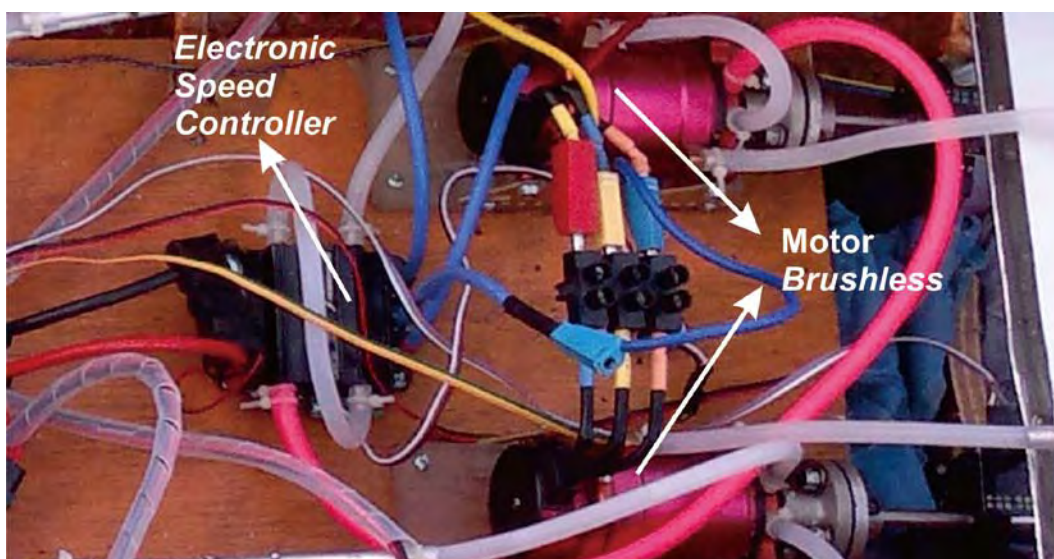




**Gambar 3.10** Motor servo sebagai penggerak rudder

- ESC dan Motor *Brushless*

Perancangan kapal prototipe ini dilengkapi dengan sistem propulsi sebagai pengendali kecepatan kapal. Sistem propulsi kapal prototipe terdiri dari dua buah motor *brushless* yang dilengkapi propeller sebagai pendorongnya. Motor *brushless* tidak memiliki sikat pada bagian rotornya. Selain itu motor *brushless* memiliki torsi yang cukup besar dibandingkan dengan motor biasa. Motor *brushless* yang digunakan sebagai penggerak propeller mempunyai kapasitas 1600kv.



**Gambar 3.11** Motor *brushless* sebagai penggerak propeller

*Motor brushless* memiliki sebuah ESC (*Elektronic Speed Control*) yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan motor, selain itu juga berfungsi untuk menaikkan jumlah arus yang diperlukan oleh motor. Kecepatan untuk motor yang keluar dari ESC diatur melalui PWM dari mikrokontroler *slave 3*. ESC yang digunakan pada kapal prototipe mempunyai kapasitas 180A.

### 3.2.3 Sistem Pengendali

Untuk mengintegrasikan seluruh sistem dan menjalankan algoritma baik mode manual maupun mode otomatis pengujian kapal, kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter dilengkapi oleh pengendali, terdiri dari :

- Komputer

Komputer *client* mengontrol seluruh sistem yang berada pada model kapal, mengirim maupun membaca sinyal tiap sistem. Dalam hal ini komputer *client* bertugas sebagai pengendali utama seluruh sistem. Komputer *server* bertindak sebagai *remote* dan sistem monitor.

- Mikrokontroler

Model kapal ini menggunakan 4 buah mikrokontroler terdiri dari *master*, *slave 1*, *slave 2* dan *slave 3*. Empat pengendali tersebut mempunyai fungsi yang berbeda.

- Mikrokontroler *master*

Mikrokontroler *master* berfungsi memproses masukan dari sensor IMU, sonar, *slave 1* dan *slave 3*. Meneruskannya berupa paket sekumpulan data berisikan informasi kondisi instrumen kapal.

- Mikrokontroler *slave 1*

Mikrokontroler *slave 1* bertugas mengubah sinyal kontrol yang diberikan oleh pengendali utama untuk dikonversi ke PWM. Motor servo merespon PWM tersebut dan merubahnya ke dalam besaran sudut defleksi rudder.

- Mikrokontroler *slave 2*

Mikrokontroler *slave 2* bertugas menerjemahkan informasi *latitude* dan *longitude* yang diterjemahkan dari protokol NMEA.



- Mikrokontroler *slave* 3

Mikrokontroler *slave* 3 bertugas menerjemahkan informasi jumlah lubang *encoder* dalam satu putaran propeller ke besaran rpm yang berasal dari *speed log* dan meneruskannya pada pengendali *master*.

### 3.2.4 Sistem Komunikasi

Sistem komunikasi pada model kapal terbagi menjadi tiga tipe yaitu digital-analog, TCP/IP dan UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

- Digital Dan Analog Sinyal

Pada sistem yang menggunakan analog to digital (ADC) ini yaitu sensor sonar. Sensor sonar ini dapat membaca halangan didepan sonar dari jarak 30 sampai dengan 30 - 1000 cm. Oleh sensor sonar pembacaan jarak tersebut dikonversikan data digital ke analog DAC 0 – 5v. Mikrokontroler master menerjemahkannya dari analog ke digital ADC.

- TCP/IP-VPN

Komunikasi ini terintegrasi antara komputer *client* pada kapal dengan komputer *server* yang berada di darat melalui sebuah router ASUS RT-14UDN yang menjangkau lokasi pengujian dengan radius 150 meter.

- UART serial

Hampir seluruh sensor, pengendali dan komputer terintegrasi dan bertukar informasi melalui protokol komunikasi ini.

### 3.3 Perangkat Lunak (*Software*)

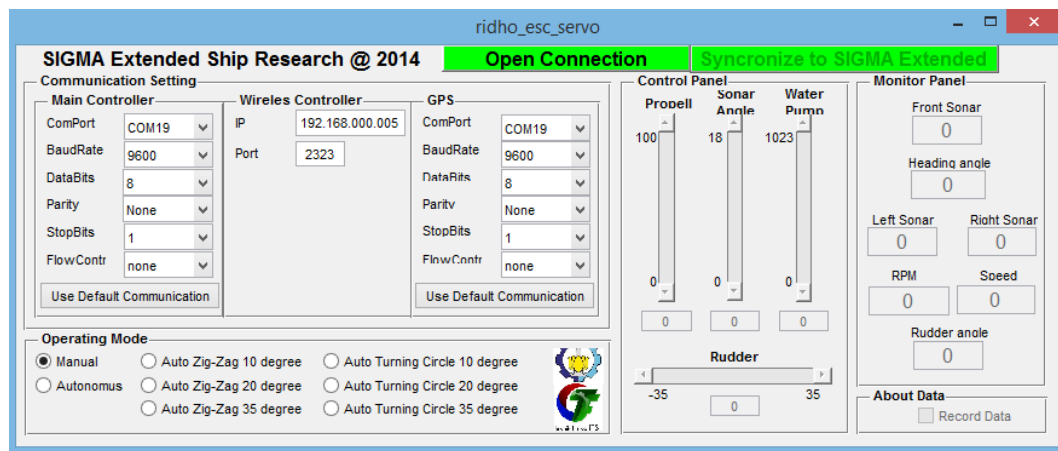
Sistem perangkat lunak (*software*) yang terinstalasi pada komputer *client* dapat dilihat di Tabel 3.2. Sistem operasi komputer yang digunakan adalah windows versi 8. Bahasa pemrograman baik pembuatan *software* berbasis GUI dan simulasi adalah Matlab versi R2013b. Bahasa pemrograman mikrokontroler yang digunakan adalah bahasa C. Sedangkan komunikasi *serial to usb*, *usb to serial* menggunakan *driver* produk FTDI 232RL.

**Tabel 3.2** Sistem perangkat lunak (*software*)

Sistem operasi komputer	Windows 8
Bahasa pemrograman komputer	Matlab R2013b
Bahasa pemrograman Mikrokontroler	Bahasa C
<i>Driver converter USB-Serial UART</i>	FTDI 232RL

### 3.3.1 *Software* Berbasis Matlab GUI pada Komputer *Client*

*Interface* sebuah *software* yang digunakan sebagai sistem kontrol dan monitor secara terpusat terdapat di komputer *client* dapat ditunjukkan pada Gambar 3.12. Terdiri dari panel pengaturan komunikasi serial dengan *master* pengendali, GPS, dan IP komputer *client* serta *port* yang digunakan untuk koneksi melalui *wireless* LAN. Panel kontrol terdiri dari kontrol kecepatan dan arah. Panel monitor menampilkan informasi jarak sonar depan, kiri, kanan, *heading*, rpm, kecepatan, dan sudut defleksi rudder.



**Gambar 3.12** *Software* berbasis matlab GUI pada komputer *client*

Panel mode operasi terdiri dari beberapa pilihan mode antara lain manual, pengujian *zig-zag* 10 derajat otomatis, pengujian *zig-zag* 20 derajat otomatis, pengujian *zig-zag* 35 derajat otomatis, pengujian *turning circle* 10 derajat otomatis, pengujian *turning circle* 20 derajat otomatis, dan pengujian *turning circle* 35 derajat otomatis. Mode manual memungkinkan kapal dapat dikontrol melalui panel kontrol dapat diakses melalui komputer *client* maupun komputer

server. Pengujian *zig-zag* dan *turning circle* secara otomatis memungkinkan algoritma *zig-zag* dan *turning circle* diimplementasikan dengan alat bantu instrumentasi berupa pengendali dimana sensor magneto meter menjadi menginformasikan arah *heading* kapal, GPS menginformasikan posisi *latitude* dan *longitude*, sebagai aktuator motor dc dapat mengatur kecepatan propeller dan motor servo dapat mengatur arah rudder.

### 3.3.2 Software Berbasis Matlab GUI pada Komputer Server

*Interface* yang digunakan sebagai sistem kontrol dan monitor secara *remote* terdapat di komputer *server* dapat ditunjukkan pada Gambar 3.13. Terdiri dari panel pengaturan komunikasi serial dengan *master* pengendali, GPS, dan IP komputer *client* serta *port* yang digunakan untuk koneksi melalui *wireless* LAN. Panel kontrol terdiri dari kontrol kecepatan dan arah.



**Gambar 3.13** Software berbasis matlab GUI pada komputer server

Panel monitor menampilkan informasi jarak sonar depan, kiri, kanan, *heading*, rpm, kecepatan, dan sudut defleksi rudder. Panel mode operasi terdiri dari beberapa pilihan mode antara lain manual, pengujian *zig-zag* 10 derajat otomatis, pengujian *zig-zag* 20 derajat otomatis, pengujian *zig-zag* 35 derajat otomatis, pengujian *turning circle* 10 derajat otomatis, pengujian *turning circle* 20 derajat otomatis, dan pengujian *turning circle* 35 derajat otomatis. Berbeda dengan *interface* yang berada di komputer *client*, *Interface* pada komputer *server* didesain lebih aplikatif, respon sudut rudder terhadap *heading* kapal ditampilkan ke dalam grafik pada panel monitor dan tidak ditanamkan algoritma pengujian *turning circle* dan *zig-zag* yang kompleks.

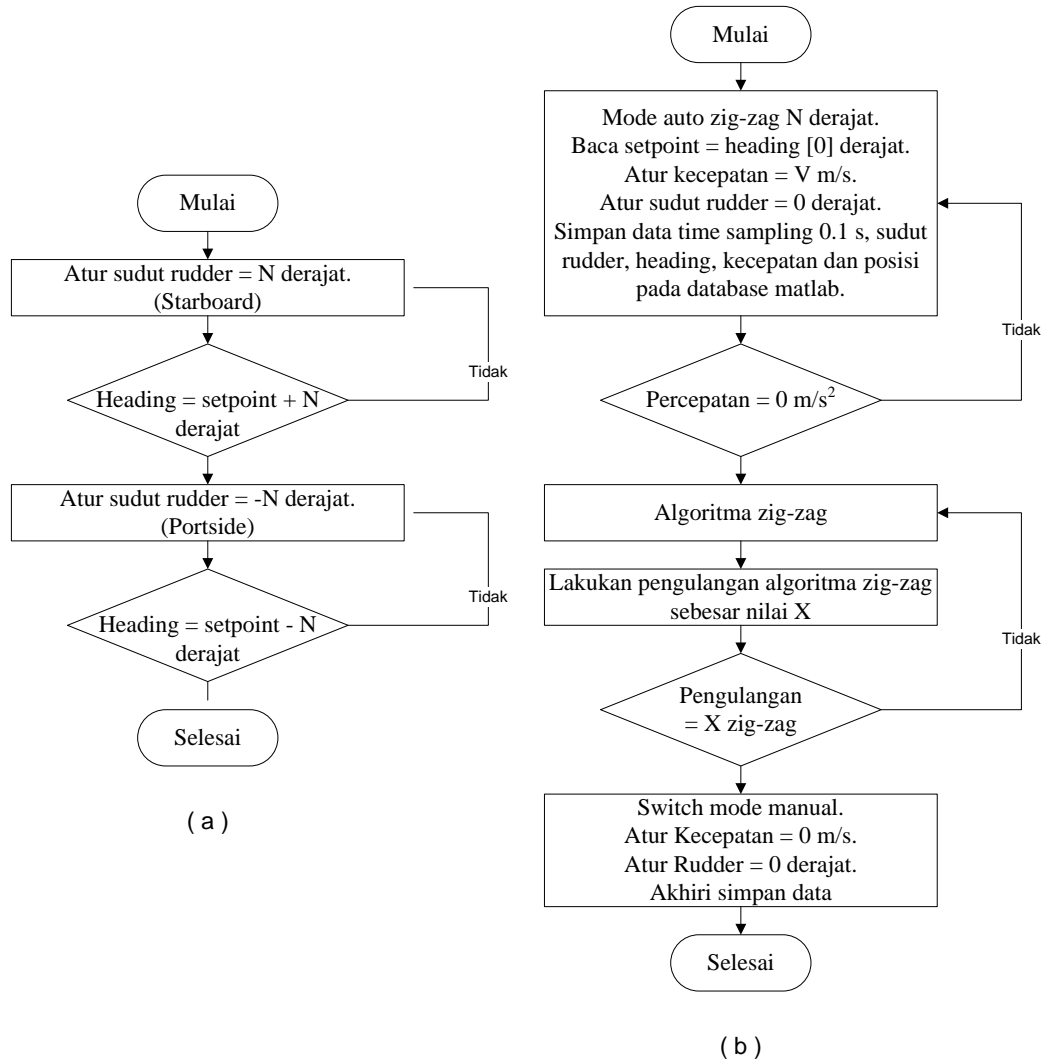
### 3.3.3 Algoritma Zig-Zag Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer Client

Gerak *zig-zag* pada kapal yang telah diatur oleh IMO kemudian direpresentasikan ke dalam program Matlab berupa suatu fungsi yang dapat dipanggil ketika diperlukan. Representasi fungsi algoritma *zig-zag* tersebut digambarkan pada Gambar 3.14.

Alogaritma *zig-zag* ditunjukkan pada Gambar 3.14 (a). IMO mengisaratkan bahwa pengujian *zig-zag* dilakukan dengan sudut 10 dan 20 derajat guna menghemat waktu pengujian. Mekanisme gerak *zig-zag* pada kapal dimulai dengan memberi masukan besarnya sudut *zig-zag*. Memberi kasukan kendali rudder sebesar sudut tertentu, kemudian menunggu *heading* kapal berubah samapai sebesar sudut rudder yang diberikan tersebut. Apabila *heading* telah tercapai, kemudian rudder dikontrol berlawanan arah dengan besar sudut yang sama, setelah itu menunggu hingga *heading* kapal bergerak sebesar sudut rudder yang diberikan tersebut.

Alogaritma fungsi *zig-zag* pada program Matlab ditunjukkan pada Gambar 3.14 (b). Sebelum memanggil fungsi ditentukan terlebih dahulu besarnya sudut pengujian sebesar N derajat. Seluruh pengujian *zig-zag* ini dilakukan secara otomatis oleh *software* GUI Matlab dengan menjalankan algoritma yang telah dirancang sebelumnya, termasuk memberi masukan kontrol sudut rudder sebesar 0 derajat, arah *heading* mula dianggap sebagai *set point* dan kapal dijalankan dengan kecepatan V m/s. Kemudian mulai dilakukan penyimpanan data

eksperimen pengujian *zig-zag* setiap 0,1 detik sekali ke dalam database. Data pengujian yang disimpan diantaranya *heading*, sudut pergerakan rudder, kecepatan dan posisi (lintang dan bujur).



**Gambar 3.14** (a) Alogaritma *zig-zag* menurut standar IMO (b) Alogaritma *zig-zag* kapal secara otomatis pada *software* matlab GUI

Setelah kapal mencapai kecepatan konstan atau percepatan  $0 \text{ m/s}^2$ , fungsi algoritma pengujian *zig-zag* pada Gambar 3.14 (a) akan dijalankan sebanyak X kali. Banyaknya perulangan algoritma pegujian *zig-zag* yang dilakukan sesuai dengan nilai X yang diberikan. Setelah algoritma *zig-zag* terpenuhi sesuai perulangan sebanyak nilai X, maka pengujian telah selesai. Memberi masukan kontrol kecepatan sebesar  $0 \text{ m/s}$ , memberi masukan kontrol rudder sebesar  $0$

derajat dan mengakhiri proses penyimpanan data eksperimen pengujian *zig-zag*. Setelah itu mode *zig-zag* otomatis kembali ke mode manual.

### 3.3.4 Algoritma *Turning Circle* Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer

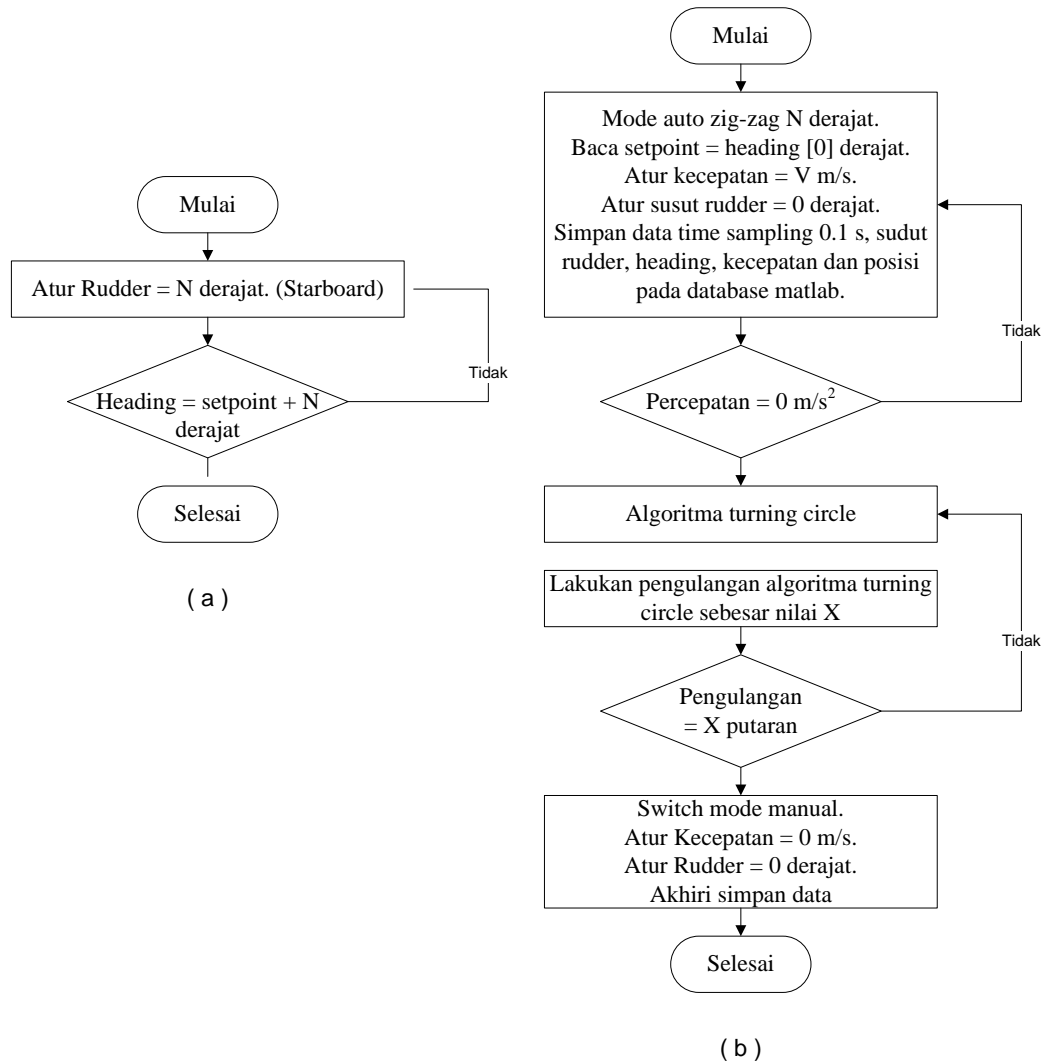
#### *Client*

Gerak *turning circle* pada kapal yang telah diatur oleh IMO kemudian direpresentasikan ke dalam program Matlab berupa suatu fungsi yang dapat dipanggil ketika diperlukan. Representasi fungsi algoritma *turning circle* tersebut digambarkan pada Gambar 3.15.

Alogaritma *turning circle* pada Gambar 3.15 (a). Pada umumnya besarnya sudut pengujian *turning circle* antara lain 10, 20 dan 35 derajat. IMO mengisaratkan bahwa pengujian *turning circle* dilakukan dengan sudut 35 derajat (sudut maksimum rudder) guna menghemat waktu pengujian. Mekanisme gerak *turning circle* pada kapal dimulai dengan memberi masukan besarnya sudut *turning circle*. Memberi masukan kendali rudder sebesar sudut N derajat, kemudian *heading* kapal berubah samapai membentuk lintasan melingkar.

Alogaritma fungsi *turning circle* pada program Matlab ditunjukkan pada Gambar 3.15 (b). Sebelum memanggil fungsi ditentukan terlebih dahulu besarnya sudut pengujian sebesar N derajat. Seluruh pengujian *turning circle* ini dilakukan secara otomatis oleh *software* GUI Matlab dengan menjalankan algoritma yang telah dirancang sebelumnya, termasuk memberi masukan kontrol sudut rudder sebesar 0 derajat, arah *heading* mula dianggap sebagai *set point* dan kapal dijalankan dengan kecepatan V m/s. Kemudian mulai dilakukan penyimpanan data eksperimen pengujian *turning circle* setiap 0,1 detik sekali ke dalam database. Data pengujian yang disimpan diantaranya *heading*, sudut pergerakan rudder, kecepatan dan posisi (lintang dan bujur). Setelah kapal mencapai kecepatan konstan atau percepatan  $0 \text{ m/s}^2$ , fungsi algoritma pengujian *turning circle* seperti pada Gambar 3.15 (a) akan dijalankan sebanyak X kali. Banyaknya perulangan algoritma pengujian *turning circle* yang dilakukan sesuai dengan nilai X yang diberikan. Setelah algoritma *turning circle* terpenuhi sesuai perulangan sebanyak nilai X, maka pengujian telah selesai. Memberi masukan kendali kecepatan sebesar 0 m/s, memberi masukan kontrol rudder sebesar 0 derajat dan mengakhiri

proses penyimpanan data eksperimen pegujian *turning circle*. Setelah itu mode *turning circle* otomatis kembali ke mode manual.

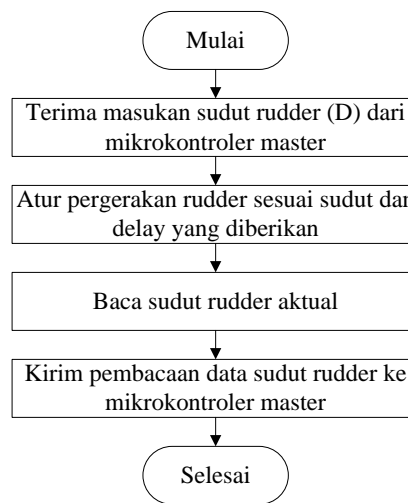


**Gambar 3.15** (a) Alogaritma *turning circle* menurut standar IMO (b) Alogaritma *turning circle* kapal secara otomatis pada *software* matlab GUI

### 3.3.5 Algoritma Program Mikrokontroler *Slave* 1

Mikrokontroler *slave* 1 berfungsi mengendalikan pergerakan rudder. Gambar 3.16 adalah algoritma program pada mikrokontroler *slave* 1. Mikrokontroler *slave* 1 dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui *port* serial. *Port* serial mikrokontroler *slave* 1 terhubung dengan mikrokontroler *master*, sehingga dapat saling berkomunikasi. Sewaktu *port* serial *slave* 1

membaca data sebesar D (nilai D dapat berubah nilainya), maka D merupakan nilai kontrol masukan sudut rudder. Selanjutnya mikrokontroler *slave* 1 mengatur keluaran sinyal PWM yang diperlukan untuk mengatur besarnya sudut putaran motor servo sesuai besarnya nilai D. Sudut pergerakan rudder akan sama dengan pergerakan sudut putar motor servo. Disamping itu mikrokontroler *slave* 1 akan terus – menerus membaca sudut aktual pergerakan rudder dan mengirmkannya ke Mikrokontroler master. Alogaritma yang terdapat pada mikrokontroler *slave* 1 selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum mikrokontroler *slave* 1 terhubung dengan catu daya.



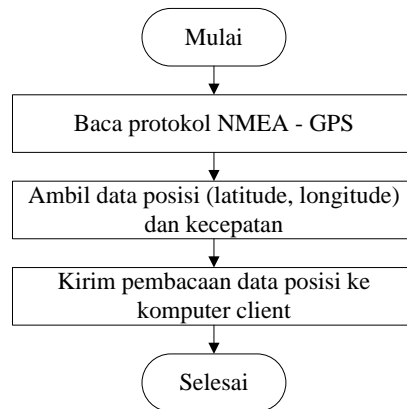
**Gambar 3.16** Algoritma program pada mikrokontroler *slave* 1

### 3.3.6 Algoritma Program Mikrokontroler *Slave* 2

Mikrokontroler *slave* 2 berfungsi membaca informasi koordinat posisi melalui GPS. Algoritma program pada mikrokontroler *slave* 2 ditunjukkan pada Gambar 3.17. Mikrokontroler *slave* 2 dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui *port* serial. *Port* serial mikrokontroler *slave* 2 terhubung dengan modul GPS, sehingga dapat saling berkomunikasi. *Port* serial *slave* 2 membaca data yang dikirim oleh GPS berupa paket data informasi posisi, kecepatan, waktu dan lain - lain. Paket data tersebut terkemas dalam protokol NMEA, sehingga tidak langsung dapat dikodekan. Untuk mengkodekan informasi yang termuat, maka dilakukan *parsing string* sesuai dengan format protokol NMEA. Dari paket data tersebut data yang diambil berupa posisi (*latitude* dan *longitude*) dan kecepatan. Kemudian data posisi dan kecepatan dikirimkan pada computer *client*



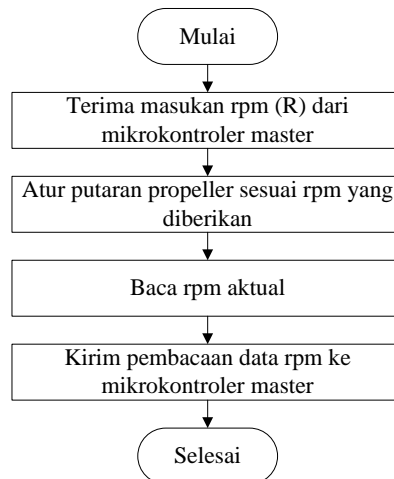
secara serial melalui *serial to usb converter*. Alogaritma yang terdapat pada Mikrokontroler *slave 2* selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum Mikrokontroler *slave 2* terhubung dengan catu daya.



**Gambar 3.17** Algoritma program pada mikrokontroler *slave 2*

### 3.3.7 Algoritma Program Mikrokontroler *Slave 3*

Mikrokontroler *slave 3* berfungsi mengatur kecepatan putar propeller dan melakukan monitor kecepatan putar propeller. Algoritma program mikrokontroler *slave 3* ditunjukkan pada Gambar 3.18. Mikrokontroler *slave 3* dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui *port* serial. *Port* serial Mikrokontroler *slave 3* terhubung dengan mikrokontroler master, sehingga dapat saling berkomunikasi. Sewaktu *port* serial *slave 3* membaca data sebesar R (nilai R dapat berubah nilainya), maka R merupakan nilai kontrol masukan ESC. Selanjutnya mikrokontroler *slave 3* mengatur keluaran sinyal PWM yang diperlukan untuk mengatur putaran motor *brushless* sesuai besarnya nilai R. Motor *brushless* terkopel dengan *shaft* dan propeller. Pada saat itu juga mikrokontroler *slave 3* membaca besarnya pulsa melalui pembacaan sensor *optocoupler* terhadap *rotary encoder*. Besarnya pulsa yang terbaca dikonversikan ke dalam rpm. Kemudian nilai rpm aktual dikirimkan ke mikrokontroler *master* melalui *port* serial. Alogaritma yang terdapat pada mikrokontroler *slave 3* selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum mikrokontroler *slave 3* terhubung dengan catu daya.



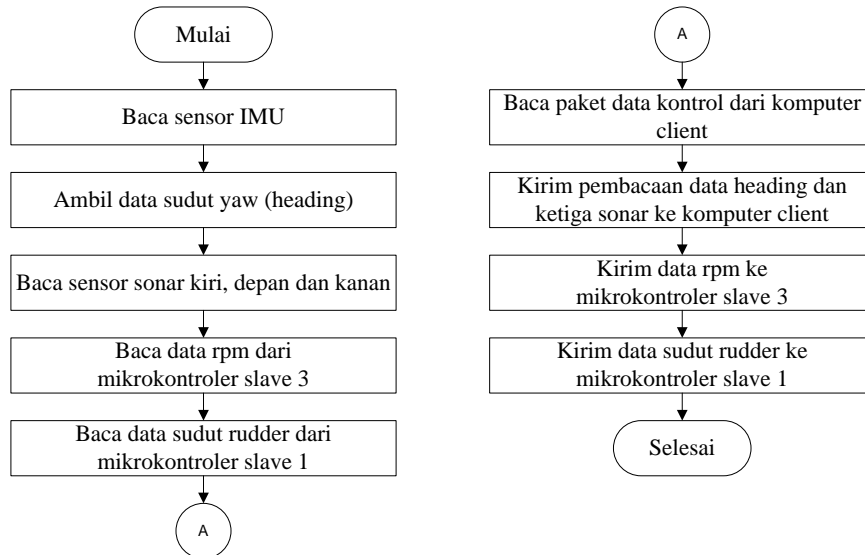
**Gambar 3.18** Algoritma program pada mikrokontroler *slave 3*

### 3.3.8 Algoritma Program Mikrokontroler *Master*

Mikrokontroler *master* berfungsi memproses masukan dari sensor IMU, sonar, *slave 1* dan *slave 3*. Meneruskannya berupa paket sekumpulan data berisikan informasi kondisi instrumen kapal. Algoritma program mikrokontroler *master* ditunjukkan pada Gambar 3.19. Mikrokontroler *master* dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui *port serial*.

*Port serial* mikrokontroler master terhubung dengan beberapa modul antara lain sensor IMU, sensor sonar (kiri, kanan dan depan), mikrokontroler *slave 1*, mikrokontroler *slave 3* dan komputer *client*, sehingga dapat saling berkomunikasi. Mikrokontroler master membaca data *heading* dari sensor magnetometer IMU melalui koneksi serial I2C. Membaca data masing – masing jarak sensor sonar kanan, kiri dan depan melalui pin *analog to digital converter* (ADC). Membaca data rpm yang dikirim oleh mikrokontroler *slave 3* melalui koneksi serial. Membaca sudut rudder yang dikirim oleh mikrokontroler *slave 1* melalui koneksi serial. Membaca paket data kontrol berupa kontrol kecepatan dan arah yang dikirim oleh komputer *client* melalui koneksi *usb to serial converter*. Selanjutnya data jarak kapal terhadap penghalang sebelah kiri, kanan, depan, *heading*, rpm, dan pergerakan rudder dikirimkan ke komputer *client*. Data kontrol kecepatan dikirimkan ke mikrokontroler *slave 3*. Data kontrol arah dikirimkan ke mikrokontroler *slave 1*. Alogaritma yang terdapat pada mikrokontroler *master*

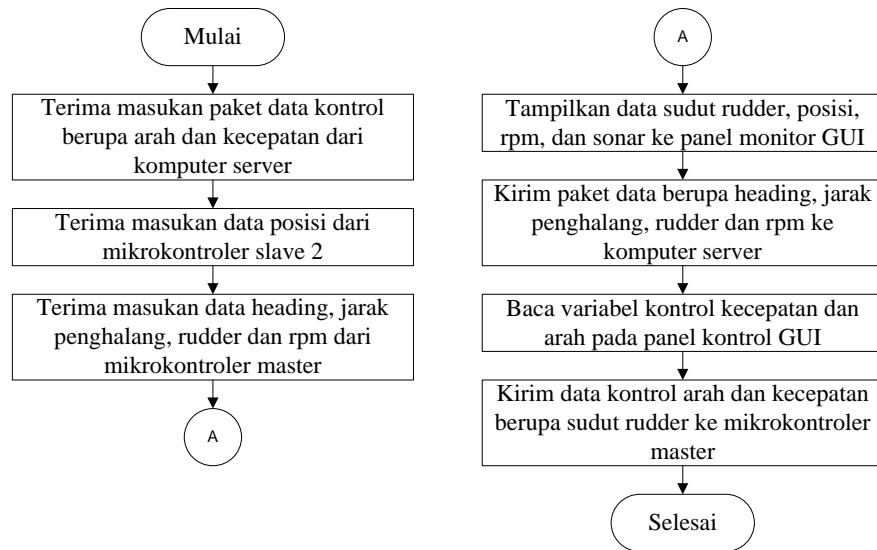
selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum mikrokontroler *master* terhubung dengan catu daya.



**Gambar 3.19** Algoritma program pada mikrokontroler *master*

### 3.3.9 Algoritma *Software* GUI Berbasis Matlab pada Komputer *Client*

Program matlab GUI komputer *client* berfungsi untuk melakukan monitor sudut rudder kapal, perancangan GUI komputer *client* dapat dilihat pada Gambar 3.20. Komputer *client* dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui *port* usb. *Port* usb komputer *client* terhubung dengan mikrokontroler *master*, mikrokontroler *slave* 2 dan komputer *server*, sehingga dapat saling berkomunikasi. Komputer *client* menerima informasi dari komputer *server* berupa masukan kontrol arah dan kecepatan, menerima informasi data posisi kapal dari mikrokontroler *slave* 2 dan menerima informasi berupa *heading*, rpm dan jarak kapal terhadap halangan dari mikrokontroler *master*. Kemudian informasi data yang berasal dari mikrokontroler ditampilkan kedalam panel monitor pada GUI komputer *client* dan diteruskan ke komputer *server* melalui komunikasi *wireless*. Informasi data yang berasal dari komputer *server* akan langsung diteruskan ke mikrokontroler sesuai dengan tugas masing – masing sebagai pengendalian arah dan kecepatan kapal.



**Gambar 3.20** Algoritma eksekusi program pada matlab GUI komputer *client*

### 3.3.10 Aplikasi *Formula Vincenty* Berbasis Matlab GUI

Formula vincenty adalah sebuah metode yang digunakan untuk memperoleh jarak antara 2 titik koordinat posisi yang sudah diketahui. Aplikasi formula vincenty ditunjukkan pada Gambar 3.21.

**Gambar 3.21** *Formula vincenty* diaplikasikan pada matlab GUI

*Interface* tersebut dirancang menggunakan Matlab GUI. Untuk menggunakan *software* tersebut cukup mudah, yaitu dengan memasukkan nilai koordinat pertama dan nilai koordinat kedua. Nilai lintang koordinat pertama dimasukkan ke kolom masukan *latitude* 1, nilai bujur koordinat pertama

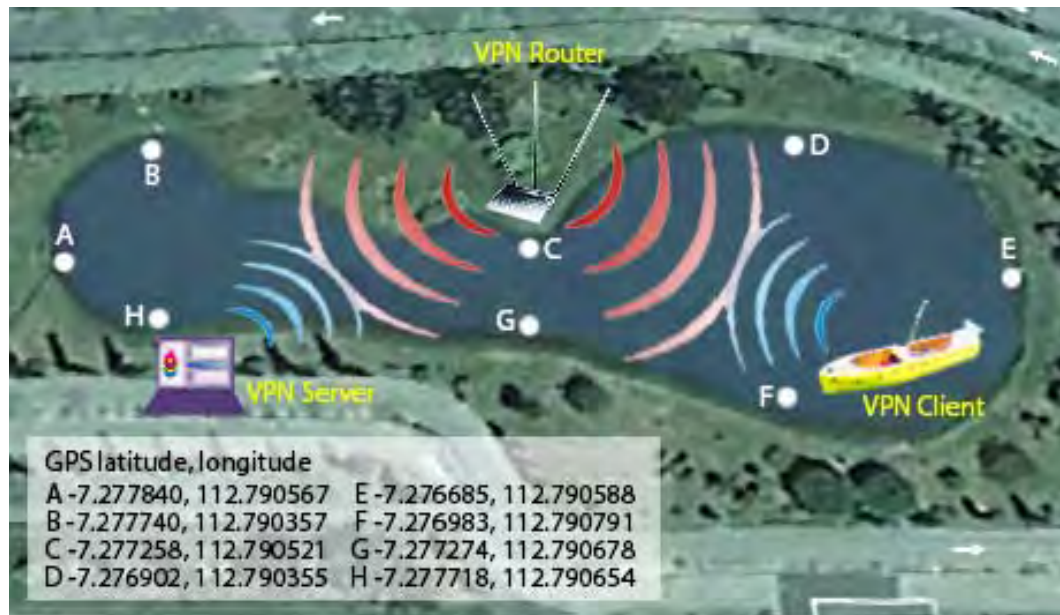
dimasukkan ke kolom masukan *longitude* 1, nilai lintang koordinat kedua dimasukkan ke kolom masukan *latitude* 2 dan nilai bujur koordinat kedua dimasukkan ke kolom masukan *latitude* 2. Semua kolom dipastikan mempunyai nilai, kemudian tekan tombol *calculate* untuk menampilkan hasil perhitungan jarak dalam satuan meter.

### 3.4 Skenario Pengujian Kapal

Penentuan lokasi pengujian merupakan hal yang penting dalam memenuhi kriteria pengujian kapal. Menurut standar IMO pengujian kapal dilakukan ditempat yang luas dengan kondisi air yang tenang, tidak dipengaruhi oleh gaya eksternal seperti angin, gelombang dan arus, kecuali gaya yang ditimbulkan oleh sistem propulsi. Penelitian berbasis eksperimen yang dilakukan oleh (Im,2010) menggunakan kapal skala 3 meter. Pengujian kapal dilakukan di laut terbuka, penelitian tersebut juga serupa oleh penelitian yang dilakukan oleh (David Moreno,2013). Karena keterbatasan lokasi *indoor* (tertutup) yang sesuai dengan kriteria tersebut, maka penelitian ini dilakukan di ruang terbuka. Pengujian kapal prototipe ini dilakukan di kolam Graha-ITS, dikarenakan area kolam yang cukup untuk dilakukan uji *turning circle* dan *zig-zag*. Waktu yang dipilih untuk pengujian antara pukul 07.00 – 10.00 atau 15.00 – 17.00, dikarenakan angin yang berhembus cukup tenang sehingga hampir tidak terjadi gelombang (Gambar 3.22).



**Gambar 3.22** Lokasi pengujian kapal di kolam Graha Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya.



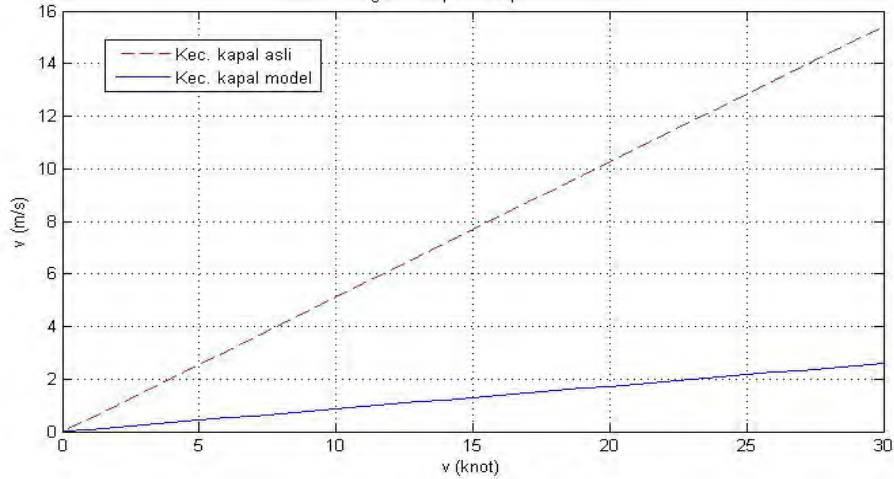
**Gambar 3.23** Sekenario pengujian kapal

Luas kolam dapat diketahui melalui perhitungan jarak antar kedua titik koordinat GPS yaitu *latitude* dan *longitude*. Dari titik yang sudah diketahui pada Gambar 3.23 maka jarak titik A ke E 127.755 meter, jarak titik D ke F 48.973 meter, jarak titik C ke G 17.427 meter dan jarak titik B ke H 32.887 meter.

Untuk pengujian *turning circle* dilakukan lintasan memanjang kolam, sedangkan pengujian *zig-zag* dilakukan pada kolam yang mempunyai diameter paling lebar. Pengujian *turning circle* yang dilakukan dengan 3 variasi yaitu dengan menggerakkan sudut rudder sebesar 10, 20 dan 35 derajat. Sedangkan pengujian *zig-zag* dilakukan dengan 2 variasi yaitu 20 dan 30 derajat, karena melakukan *zig-zag* 35 derajat tidak mencukupi untuk dilakukan di kolam ini.

Kecepatan operasional prototipe dihitung dengan menggunakan Froude number. Bilangan froude adalah sebuah bilangan tak bersatuan yang digunakan untuk mengukur resistensi dari sebuah benda yang bergerak melalui air, dan membandingkan benda-bendadengan ukuran yang berbeda-beda. Rumus Froude number dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.1 berikut ini :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (3.1)$$



**Gambar 3.24** Kecepatan kapal SIGMA *extended* asli dan skala model

Dengan  $Fr$  sebagai bilangan froude,  $v$  adalah kecepatan kapal asli (m/s),  $g$  merupakan gaya gravitasi ( $m/s^2$ ) dan  $L$  adalah panjang kapal. Sehingga kecepatan kapal SIGMA *extended* dan kapal prototipe dapat direpresentasikan pada Gambar 3.24.

### 3.5 Perhitungan Parameter Dinamika Kapal Perang SIGMA *Extended* Skala 3 Meter Secara Nomoto

Pemodelan dinamika kapal menggunakan struktur model dinamika Nomoto. Model menggunakan satu variable gerak yaitu sudut yaw atau *heading*, sehingga model dinamika Nomoto sesuai untuk digunakan dalam rangka memperoleh model dinamika linier.

Dari serangkaian pengujian, data yang digunakan dalam pemodelan yaitu *turning circle* 20 derajat yang telah melalui proses filter. Filter yang digunakan adalah *moving average*. Diketahui model dinamika Nomoto diketahui sebagai berikut :

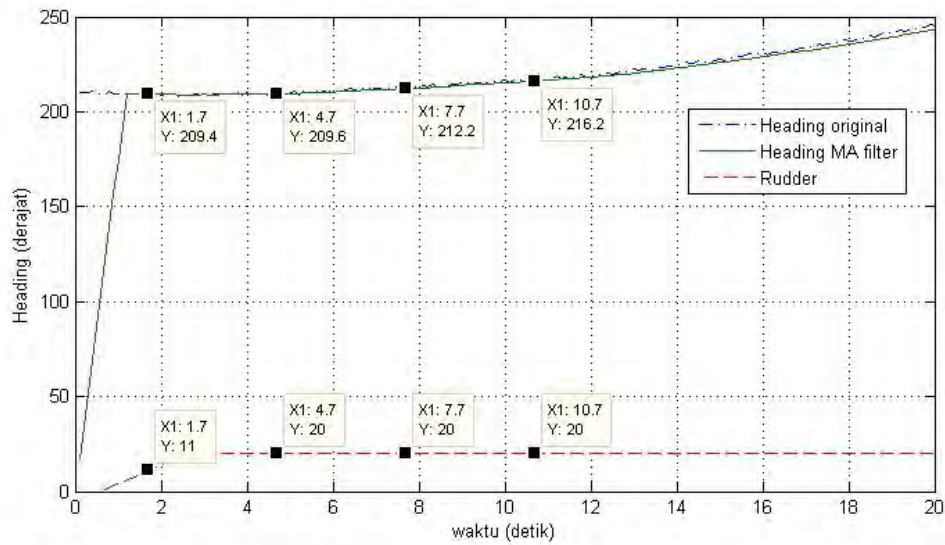
$$\frac{\psi}{\delta} = \frac{K(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (3.2)$$

$$(1+T_1s)(1+T_2s)s\psi = K(1+T_3s)\delta$$

Untuk memperoleh parameter  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_3$  dilakukan dengan cara menurunkan persamaan 3.2, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 s\psi + s^2\psi(T_1 + T_2) + s^3\psi(T_1 \cdot T_2) &= \delta K + s\delta K T_3 \\
 \Delta\psi + \Delta^2\psi(T_1 + T_2) + \Delta^3\psi(T_1 \cdot T_2) &= \delta K + \Delta\delta K T_3 \\
 \Delta^2\psi(T_1 + T_2) + \Delta^3\psi(T_1 \cdot T_2) - \delta K - \Delta\delta K T_3 &= -\Delta\psi \\
 \delta K + \Delta\delta K T_3 - \Delta^2\psi(T_1 + T_2) - \Delta^3\psi(T_1 \cdot T_2) &= \Delta\psi
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Dari persamaan 3.3 diperlukan lima data dalam menentukan nilai  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_3$ . Data yang diperlukan diantaranya  $\delta$  (*rudder*),  $\Delta\delta$  (selisih  $\delta(t)$  dan  $\delta(t-1)$ ),  $\Delta\psi$  (selisih  $\psi(t)$  dan  $\psi(t-1)$ ),  $\Delta^2\psi$  (selisih  $\psi(t)$  dan  $\psi(t-2)$ ), dan  $\Delta^3\psi$  (selisih  $\psi(t)$  dan  $\psi(t-3)$ ). Data yang diperoleh dari pengujian *turning circle* 20 derajat yaitu  $\delta$  (*rudder*) dan  $\psi$  (*heading*). Sedangkan nilai  $\Delta\delta$ ,  $\Delta\psi$ ,  $\Delta^2\psi$  dan  $\Delta^3\psi$  diperoleh melalui perhitungan. Data yang digunakan yaitu data *rudder* pada saat mengalami transisi hingga mencapai kondisi stabil 20 derajat. Empat sampel data *heading* pada database *turning circle* 20 derajat dapat dilihat pada gambar 3.25, dimana garis berwarna hijau adalah sudut *heading* dan garis berwarna biru adalah sudut *rudder*.



**Gambar 3.25** Pemilihan data *sample heading* pada data pengujian *turning circle* 20 derajat



**Tabel 3.3** Data *sample* pengujian *turning circle* 20 derajat

Data	<i>Time</i> <i>sampling</i> (detik)	$\delta$ <i>Rudder</i> (derajat)	$\Delta\delta$	$\psi$ <i>Heading</i> (derajat)	$\Delta\psi$	$\Delta^2\psi$	$\Delta^3\psi$
1	1,7	11	1	209,42	0,04	0,059	0,042
2	4,7	20	0	209,576	0,021	0,179	0,125
3	7,7	20	0	212,253	0,169	0,189	0,29
4	10,7	20	0	216,359	0,1	0,308	0,576

Tabel 3.3 merupakan data sudut rudder ( $\delta$ ), selisih sudut rudder ( $\Delta\delta$ ), sudut *heading* ( $\psi$ ), selisih *heading* ( $\Delta\psi$ ), selisih kuadrat *heading* ( $\Delta^2\psi$ ) dan selisih pangkat tiga *heading* ( $\Delta^3\psi$ ) yang terdapat pada 4 titik yaitu titik 1, titik 2, titik 3, dan titik 4. Dari data yang tersaji pada tabel 3.3, maka dapat dihitung nilai K, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, dan T<sub>3</sub> dengan cara sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_1 \\ b_1 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \delta 1 & \Delta\delta 1 & -\Delta^2\psi 1 & -\Delta^3\psi 1 \\ \delta 2 & \Delta\delta 2 & -\Delta^2\psi 2 & -\Delta^3\psi 2 \\ \delta 3 & \Delta\delta 3 & -\Delta^2\psi 3 & -\Delta^3\psi 3 \\ \delta 4 & \Delta\delta 4 & -\Delta^2\psi 4 & -\Delta^3\psi 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K \\ KT_3 \\ (T_1 + T_2) \\ (T_1 \cdot T_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\psi 1 \\ \Delta\psi 2 \\ \Delta\psi 3 \\ \Delta\psi 4 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} 20 & 1 & -0,59 & -0,042 \\ 20 & 0 & -0,179 & -0,125 \\ 20 & 0 & -0,189 & -0,29 \\ 20 & 0 & -0,308 & -0,576 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K \\ KT_3 \\ (T_1 + T_2) \\ (T_1 \cdot T_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04 \\ 0,179 \\ 0,169 \\ 0,1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} K \\ KT_3 \\ (T_1 + T_2) \\ (T_1 \cdot T_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 & 1 & -0,59 & -0,042 \\ 20 & 0 & -0,179 & -0,125 \\ 20 & 0 & -0,189 & -0,29 \\ 20 & 0 & -0,308 & -0,576 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0,04 \\ 0,179 \\ 0,169 \\ 0,1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} K \\ KT_3 \\ (T_1 + T_2) \\ (T_1 \cdot T_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,014 \\ -0,2 \\ 0,508 \\ 0,029 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dari perhitungan persamaan 3.6 diatas didapatkan persamaan 3.7 didapatkan nilai K sebesar 0,014 sehingga dapat dihitung nilai T3 sebesar -14,286. Selanjutnya nilai T1 dan T2 dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$T_1 + T_2 = 0,508 \quad (3.8)$$

$$T_1 = 0,508 - T_2$$

$$T_1 T_2 = 0,029 \quad (3.9)$$

Persamaan 3.8 disubstitusikan kepersamaan 3.9 diperoleh :

$$0,508 T_2 - T_2^2 = 0,029 \quad (3.10)$$

$$-T_2^2 + 0,508 T_2 + 0,029 = 0$$

Besar T1 dan T2 dicari menggunakan persamaan 3.11.

$$T_1, T_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.11)$$

$$T_1, T_2 = \frac{-0,508 \pm \sqrt{0,258 + 0,116}}{-2}$$

$$T_1, T_2 = \frac{-0,508 \pm 0,612}{-2} \quad (3.12)$$

$$T_1 = \frac{-0,508 + 0,612}{-2}; T_2 = \frac{-0,508 - 0,612}{-2}$$

$$T_1 = 0,052$$

$$T_2 = 0,56$$

Dari eksperimen pengujian *turning circle* sudut *rudder* 20 derajat ini diperoleh parameter Nomoto dengan nilai K sebesar 0,014,  $T_1$  sebesar 0,052,  $T_2$  sebesar 0,56 dan  $T_3$  adalah -14,286.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini mendeskripsikan hasil dan pembahasan dari perancangan yang telah dilakukan berdasarkan hasil eksperimen. *Software* yang digunakan untuk eksperimen dan simulasi pada penelitian ini menggunakan Matlab R2013b berbasis m-file dan GUI. Analisa awal disajikan performansi pengujian kapal meliputi uji *turning circle* dan *zig-zag*. Hasil evaluasi kriteria kapal menggunakan standar yang telah ditetapkan IMO. Hasil perhitungan parameter model dinamika kapal secara Nomoto. Kemudian yang terakhir yaitu analisa *step respon open loop* melalui uji validasi model.

#### **4.1 Hasil Eksperimen Pengujian *Turning Circle* pada Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* Skala 3 Meter**

Pengujian kapal prototipe dilakukan di kolam Graha-ITS pada tanggal 18 juni 2014. Pengujian dilakukan pada pukul 15.00 sampai dengan 17.00. Keseluruhan percobaan ini menggunakan satu variasi kecepatan rata – rata 1 sampai 1,2 m/s. Tahap persiapan awal pengujian ini adalah dengan mengintegrasikan seluruh komponen instrumen yang terpasang dan memastikan kapasitas baterai dalam keadaan penuh.

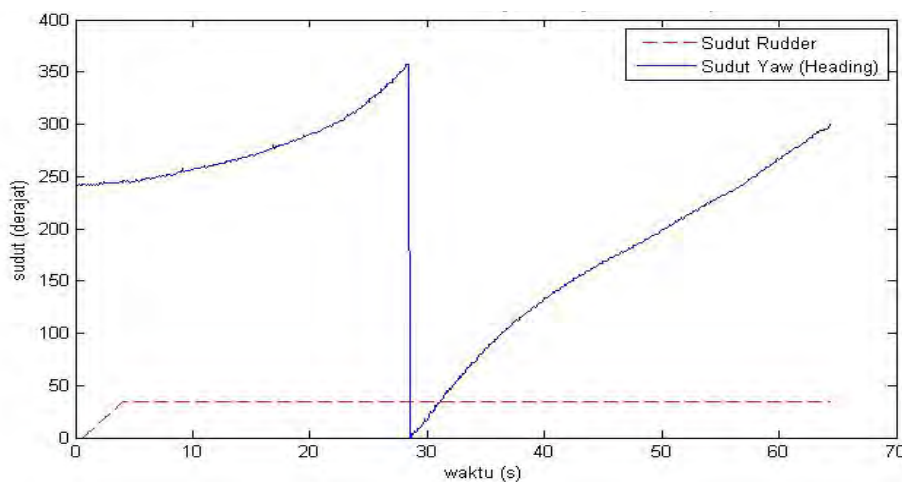
Tahap kedua adalah menjalankan *software* matlab GUI pada komputer *client* kemudian melakukan *pengaturan* komunikasi *port* serial dan *IP-port wireless* VPN, pada komputer *server* hanya dilakukan pengaturan *IP-port wireless* VPN. Untuk memastikan sistem instrumen berjalan dengan baik, maka masing - masing diberi masukan sinyal kontrol. Pengecekan apakah masukan yang diberikan sesuai dengan respon aktuator dan apakah informasi sensor yang ditampilkan sesuai dengan kondisi kapal.

Setelah tahap persiapan selesai, selanjutnya adalah pengujian utama *turning circle* dengan menetapkan *set point heading* kapal. Menentukan *set point heading* kapal pada *turning circle* ini penting guna memberi masukan pada

*software* berapa kali jumlah putaran yang diinginkan. Pengujian yang dilakukan yaitu *turning circle* variasi 10, 20 dan 35 derajat. GUI Matlab sudah ditanamkan algoritma *turning circle* sebelumnya sehingga pengujian ini berjalan secara otomatis.

#### 4.1.1 Hasil Eksperimen Pengujian *Turning Circle* 35 Derajat

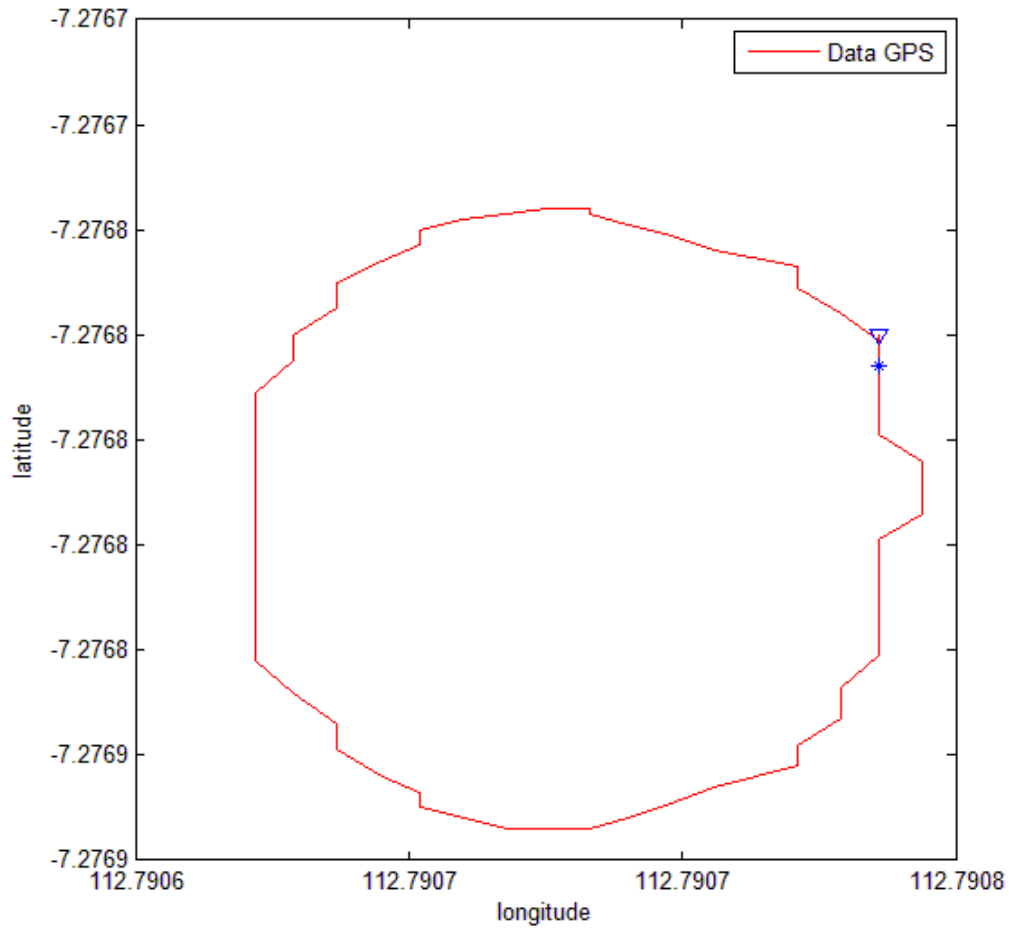
Pengujian pertama yaitu *turning circle* 35 derajat Gambar 4.1. Pada pengujian *turning circle* 35 derajat data eksperimen disampling dengan waktu 0,1 detik. Kecepatan tertinggi 0,7 m/s. Set point *heading* kapal awalnya menunjukkan *heading* 241 derajat, kemudian kapal mulai bergerak melingkar. Pada Gambar 4.1 waktu tempuh satu putaran yaitu ketika *heading* kapal menunjukkan arah 241 derajat selanjutnya yaitu pada waktu 56,6 detik.



**Gambar 4.1** Data rudder dan *heading* pengujian *turning circle* 35 derajat

Untuk memperoleh lintasan kapal selama pengujian *turning circle* 35 derajat, dilakukan dengan mengambil informasi koordinat posisi berupa *latitude* dan *longitude* selama proses pengujian berlangsung. Ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter dengan pembacaan 4 satelit. Pengambilan informasi posisi dilakukan setiap 0,1 detik sekali. Lintasan kapal yang diperoleh melalui hasil eksperimen *turning circle* 35 derajat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.2. Terlihat bahwa lintasan *turning circle* 35 derajat tidak melingkar secara sempurna dikarenakan ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter. Mulanya kapal berada pada tanda segitiga, bergerak melingkar dengan pemberian sudut rudder 35

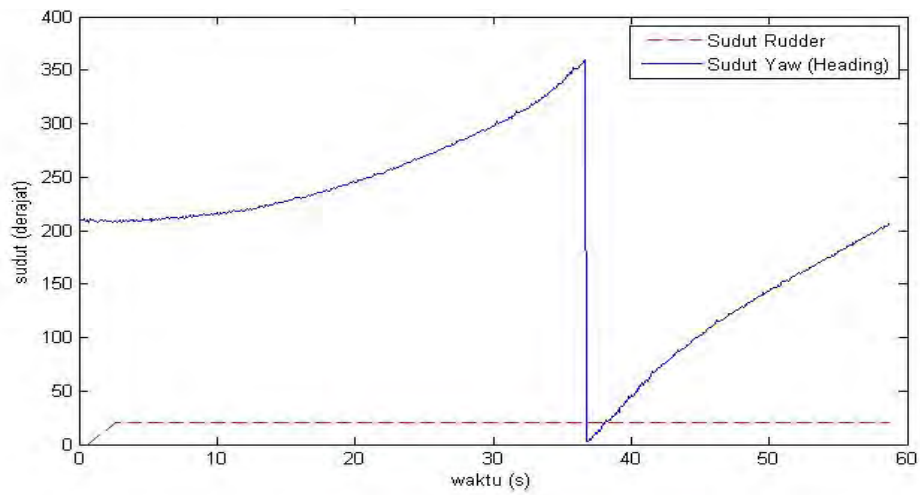
derajat. Kapal telah menempuh lintasan satu putaran ditunjukkan pada tanda bintang.



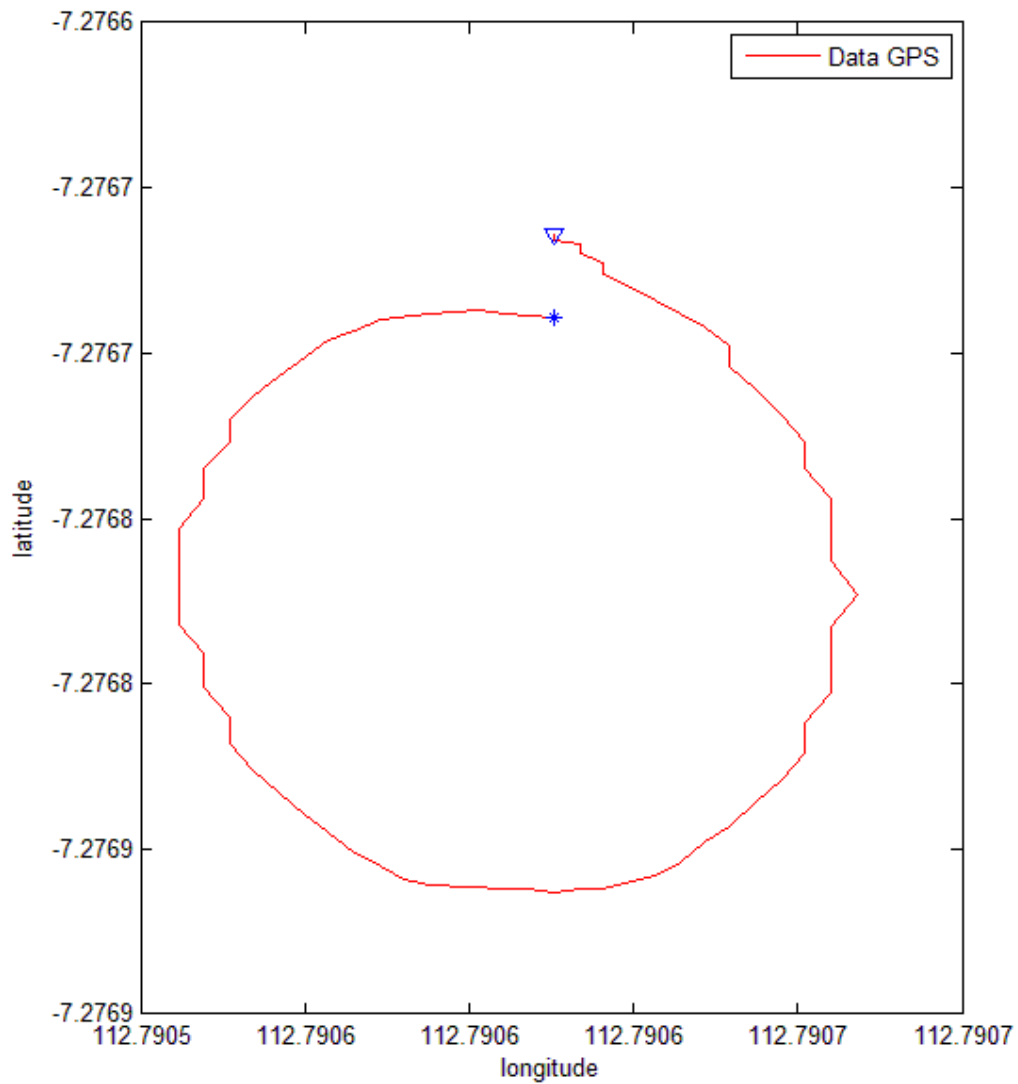
**Gambar 4.2** Data koordinat GPS pengujian *turning circle* 35 derajat

#### 4.1.2 Hasil Eksperimen Pengujian *Turning Circle* 20 Derajat

Pengujian kedua yaitu *turning circle* 20 derajat Gambar 4.3. Pengujian *turning circle* 20 derajat data eksperimen disampling dengan waktu 0,1 detik. Kecepatan tertinggi 1 m/s. Set point *heading* kapal awalnya menunjukkan 210 derajat, kemudian kapal mulai bergerak melingkar. Pada Gambar 4.3 waktu tempuh satu putaran ketika kapal berada di 210 derajat, yaitu pada waktu mencapai 58,7 detik.



**Gambar 4.3** Data rudder dan *heading* pengujian *turning circle* 20 derajat

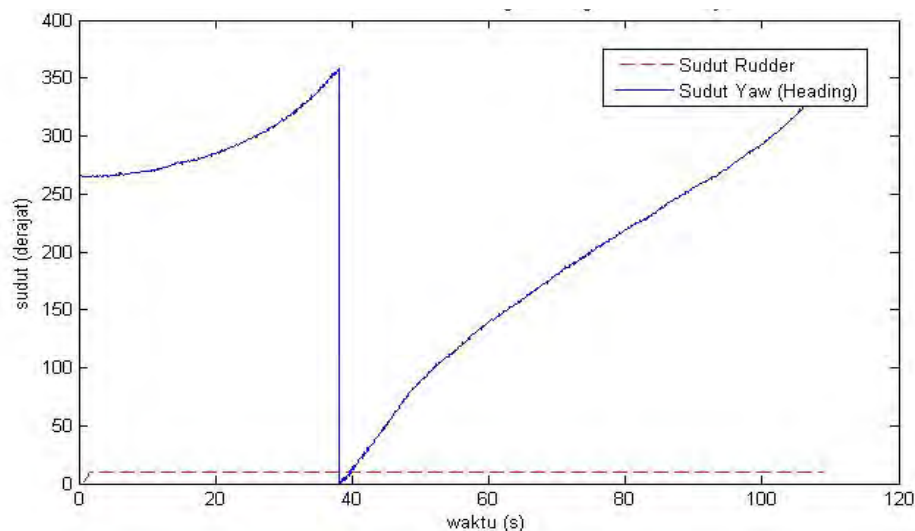


**Gambar 4.4** Data koordinat GPS pengujian *turning circle* 20 derajat

Untuk memperoleh lintasan kapal selama pengujian *turning circle* 20 derajat, dilakukan dengan mengambil informasi koordinat posisi berupa *latitude* dan *longitude* selama proses pengujian berlangsung. Ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter dengan pembacaan 4 satelit. Pengambilan informasi posisi dilakukan setiap 0,1 detik sekali. Lintasan kapal yang diperoleh melalui hasil eksperimen *turning circle* 20 derajat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.4. Terlihat bahwa lintasan *turning circle* 20 derajat melingkar hampir sempurna. Mulanya kapal berada pada tanda segitiga, bergerak melingkar dengan pemberian sudut rudder 20 derajat. Kapal telah menempuh lintasan satu putaran ditunjukkan pada tanda bintang.

#### 4.1.3 Hasil Eksperimen Pengujian *Turning Circle* 10 Derajat

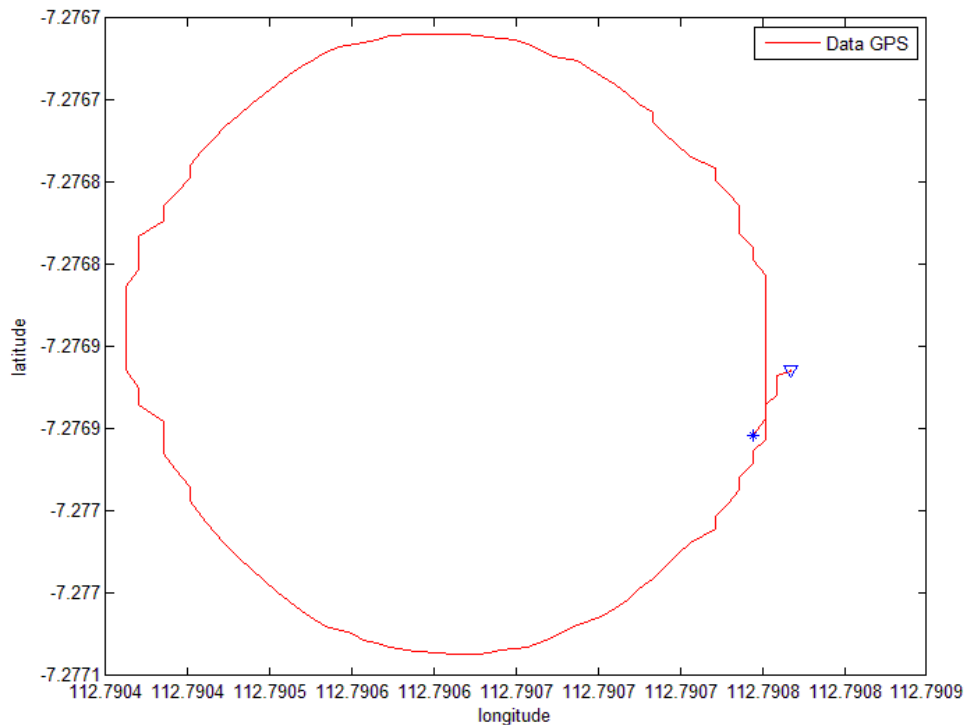
Pengujian ketiga yaitu *turning circle* 10 derajat Gambar 4.5. Pengujian *turning circle* 10 derajat data eksperimen disampling dengan waktu 0,1 detik. Kecepatan tertinggi 1,1 m/s. Set point *heading* kapal awalnya menunjukkan 265 derajat, kemudian kapal mulai bergerak melingkar. Pada Gambar 4.5 waktu tempuh satu putaran ketika kapal berada di 265 derajat, yaitu pada waktu mencapai 93,2 detik.



**Gambar 4.5** Data rudder dan *heading* pada pengujian *turning circle* 10 derajat



Untuk memperoleh lintasan kapal selama pengujian *turning circle* 10 derajat, dilakukan dengan mengambil informasi koordinat posisi berupa *latitude* dan *longitude* selama proses pengujian berlangsung. Ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter dengan pembacaan 4 satelit. Pengambilan informasi posisi dilakukan setiap 0,1 detik sekali. Lintasan kapal yang diperoleh melalui hasil eksperimen *turning circle* 10 derajat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.6. Terlihat bahwa lintasan *turning circle* 10 derajat melingkar secara sempurna dikarenakan ketelitian GPS yang digunakan cukup kecil nilainya dari diameter lingkaran lintasan. Mulanya kapal berada pada tanda segitiga, bergerak melingkar dengan pemberian sudut rudder 10 derajat. Kapal telah menempuh lintasan satu putaran ditunjukkan pada tanda bintang.



**Gambar 4.6** Data koordinat GPS pengujian *turning circle* 10 derajat

## 4.2 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag pada Kapal Perang Kelas SIGMA

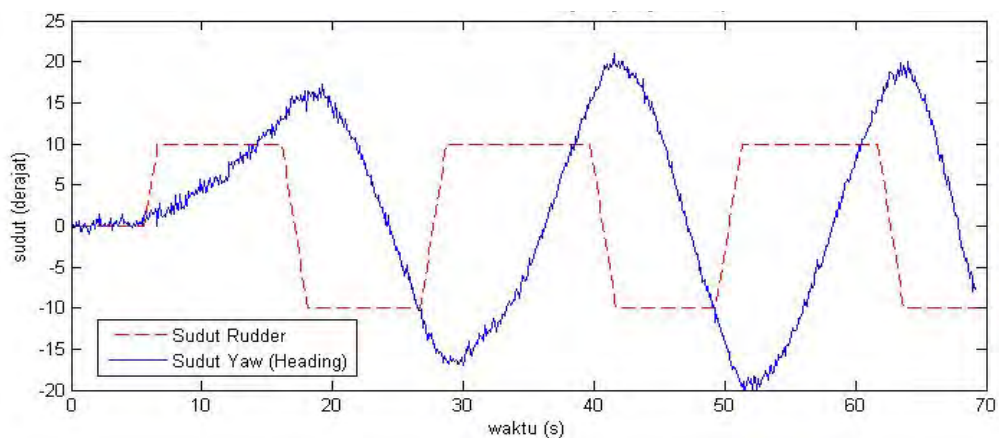
### *Extended Skala 3 Meter*

Pengujian kapal prototipe dilakukan di kolam Graha-ITS pada tanggal 18 juni 2014. Pengujian dilakukan pada pukul 15.00 sampai dengan 17.00.

Keseluruhan percobaan ini menggunakan satu variasi kecepatan rata – rata 1 sampai 1,2 m/s. Tahap persiapan awal dari pengujian ini adalah dengan mengintegrasikan seluruh komponen instrumen yang terpasang dan memastikan kapasitas baterai dalam keadaan lebih dari 80%. Tahap kedua adalah menjalankan *software* matlab GUI pada komputer *client* kemudian melakukan pengaturan komunikasi *port* serial dan *IP-port wireless* VPN, pada komputer *server* hanya dilakukan pengaturan *IP-port wireless* VPN. Untuk memastikan sistem instrumen berjalan dengan baik, maka masing - masing diberi masukan sinyal kontrol. apakah masukan yang diberikan sesuai dengan respon aktuator dan apakah informasi sensor yang ditampilkan sesuai dengan kondisi kapal. Setelah tahap persiapan selesai selanjutnya adalah pengujian utama *zig-zag* dengan menetapkan *set point heading* kapal. Menentukan *set point heading* kapal pada *zig-zag* ini penting guna member inputan pada *software* berapa kali jumlah putaran yang diinginkan. Pada Gambar 3.6 merupakan visualisasi GUI matlab yang terdapat pengujian *zig-zag* variasi 10 dan 20 derajat. *Software* GUI matlab sudah ditanamkan alogaritma *zig-zag* sebelumnya sehingga pengujian ini berjalan otomatis.

#### 4.2.1 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag 10 Derajat

Tidak hanya dilakukan pengujian *turning circle* 35, 20, dan 10 derajat, kapal perang kelas SIGMA ini juga dilakukan uji *zig-zag* dengan sudut rudder sebesar 10 derajat.

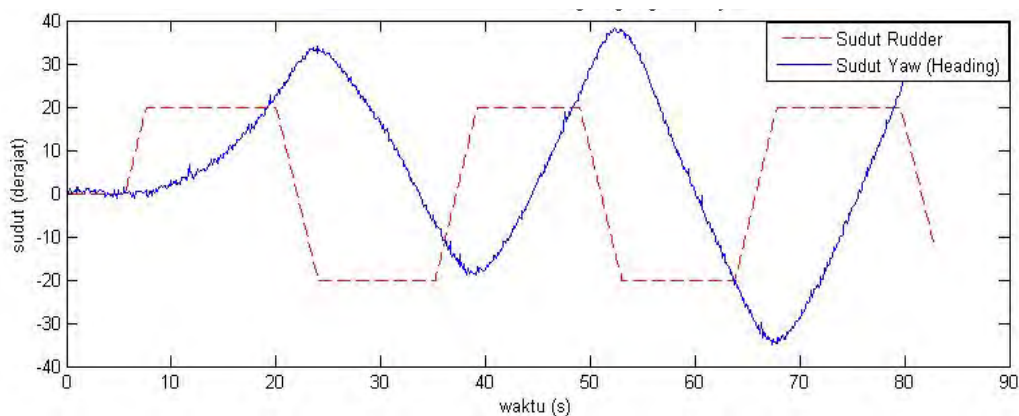


**Gambar 4.7** Data rudder dan *heading* pengujian *zig-zag* 10 derajat

Gambar 4.7 menunjukkan hubungan sudut pada data rudder dan *heading* pada saat pengujian *zig-zag* 10 derajat. Dari data eksperimen pengujian *zig-zag* 10 derajat diketahui belokan pertama nilai *heading* sebesar 16,81 yaitu pada detik ke 19. Sedangkan pada belokan kedua nilai *heading* sebesar -16,88 yaitu pada detik ke 29,6.

#### 4.2.2 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag 20 Derajat

Selain pengujian *zig-zag* dengan sudut rudder sebesar 10 derajat, juga dilakukan uji *zig-zag* dengan sudut rudder yang berbeda yaitu 20 derajat. Gambar 4.8 menunjukkan hubungan antara sudut rudder dan sudut *heading* pada saat uji *zig-zag* dengan sudut rudder 20 derajat. Dari data eksperimen pengujian *zig-zag* 10 derajat diketahui belokan pertama nilai *heading* sebesar 32,64 yaitu pada detik ke 24. Sedangkan pada belokan kedua nilai *heading* sebesar -19,16 yaitu pada detik ke 39,9. Dari data yang diketahui, belokan ke-dua mengindikasikan kegagalan manuver dan mulai menyesuaikan kondisi pada belokan ke tiga.



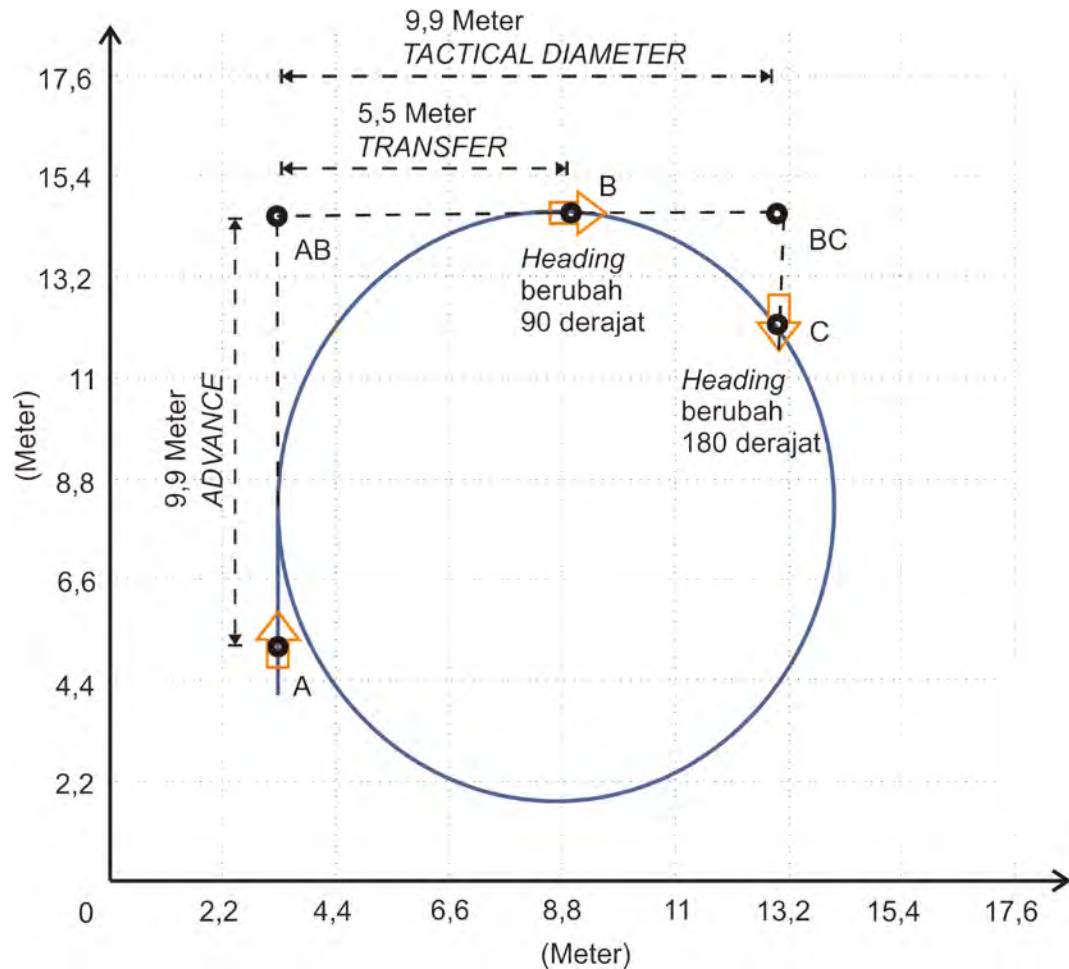
**Gambar 4.8** Data rudder dan *heading* pengujian *zig-zag* 20 derajat

#### 4.3 Evaluasi Kriteria Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* Skala 3 Meter

Evaluasi kriteria kapal mengindikasikan bahwa seberapa baik kemudi dan performansi kontrol penggerak rudder selama proses manuver *turning circle* dan *zig-zag*. Evaluasi kriteria kapal ini telah ditetapkan oleh IMO.

#### 4.3.1 Evaluasi Kriteria Kapal Pada *Turning Circle* 35 Derajat

Dari hasil pengujian *turning circle* sudut rudder 35 derajat pada subbab 4.1.1, didapatkan evaluasi kriteria kapal pada gambar 4.9. Gambar tersebut adalah visualisasi dalam satuan meter dari Gambar 4.2.



**Gambar 4.9** Evaluasi kriteria pengujian *turning circle* 35 derajat

Dari data eksperimen, diketahui titik A merupakan awal kapal bergerak yaitu berada di koordinat (lintang -7,276781 dan bujur 112,790786) bergerak 241 derajat arah *heading* kapal. Titik B merupakan posisi kapal ketika bergerak 90 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276872 dan bujur 112,79074) bergerak 333 derajat arah *heading* kapal. Titik C merupakan posisi kapal ketika bergerak 180 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276864 dan bujur 112,790695) bergerak 63 derajat arah *heading* kapal. Titik AB merupakan proyeksi siku dari awal kapal bergerak dan telah mencapai 90 derajat arah

*heading* kapal, berada di koordinat (lintang -7,27687 dan bujur 112,79079). Titik BC merupakan proyeksi siku kapal telah mencapai 90 derajat dan 180 derajat arah *heading* kapal, berada di koordinat (lintang -7,27687 dan bujur 112,7907).

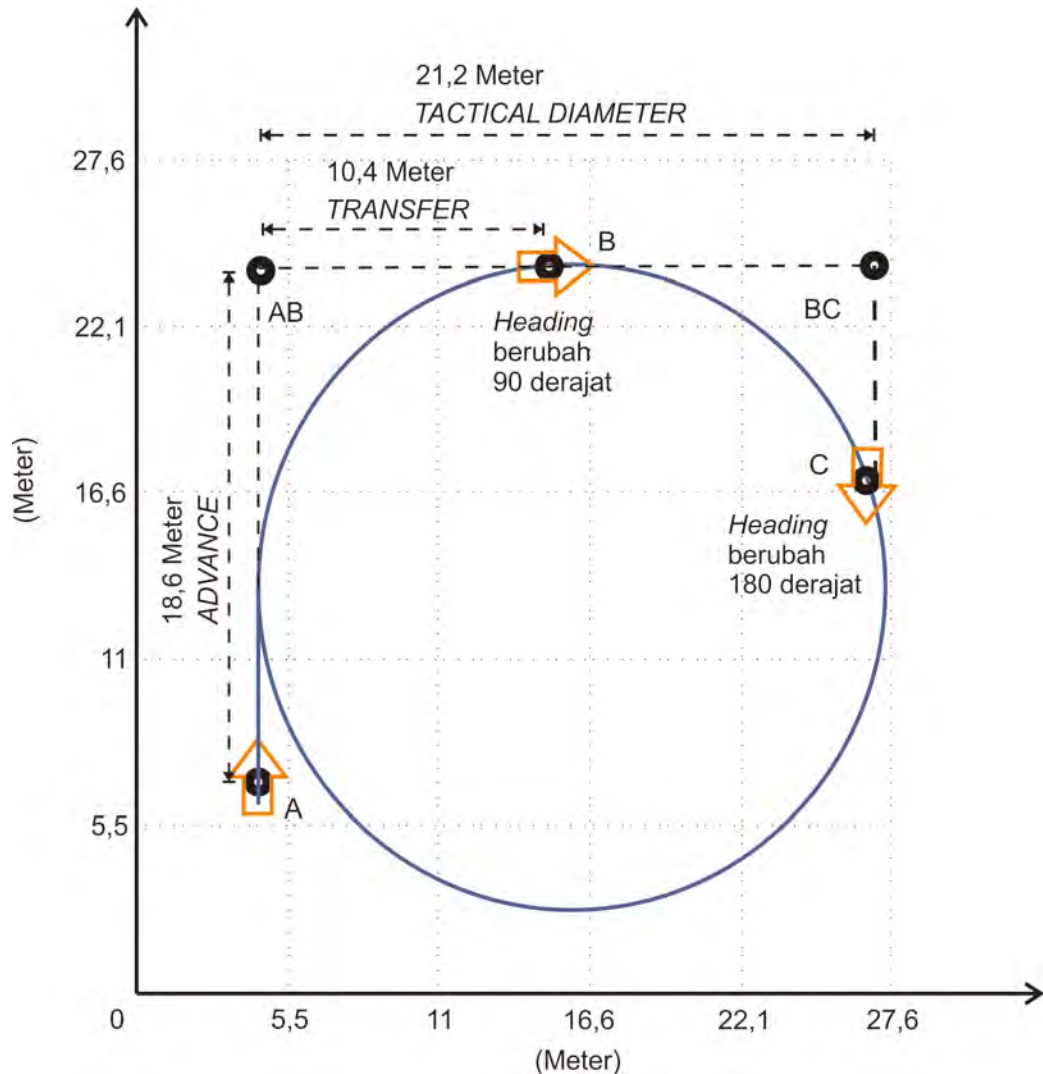
Jarak *advance* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu y, pada gambar 4.9 pada titik A ke AB sebesar 9,953 meter. Jarak *transfer* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu x, pada gambar 4.9 pada titik AB ke B sebesar 5,521 meter. Jarak *tactical diameter* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 180 derajat sumbu x, pada gambar 4.9 pada titik AB ke BC sebesar 9,939 meter.

#### **4.3.2 Evaluasi Kriteria Kapal Pada *Turning Circle* 20 Derajat**

Dari hasil pengujian *turning circle* sudut rudder 20 derajat pada subbab 4.1.2, didapatkan evaluasi kriteria kapal pada gambar 4.10. Gambar tersebut adalah visualisasi dalam satuan meter dari gambar 4.4. Dari data eksperimen, diketahui titik A merupakan awal kapal bergerak yaitu berada di koordinat (lintang -7,276715 dan bujur 112,790626) bergerak 209 derajat arah *heading* kapal. Titik B merupakan posisi kapal ketika bergerak 90 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276886 dan bujur 112,790687) bergerak 299 derajat arah *heading* kapal. Titik C merupakan posisi kapal ketika bergerak 180 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276909 dan bujur 112,79058) bergerak 29 derajat arah *heading* kapal. Titik AB merupakan proyeksi siku dari awal kapal bergerak dan telah mencapai 90 derajat arah *heading* kapal, berada di koordinat (lintang -7,276822 dan bujur 112,790756). Titik BC merupakan proyeksi siku kapal telah mencapai 90 derajat dan 180 derajat arah *heading* kapal, berada di koordinat (lintang -7,276956 dan bujur 112,790619).

Jarak *advance* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu y, pada gambar 4.10 pada titik A ke AB sebesar 18,604 meter. Jarak *transfer* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu x, pada gambar 4.10 pada titik AB ke B sebesar 10,4 meter. Jarak *tactical diameter* adalah jarak pelaksanaan awal kapal

bergerak hingga kapal bergerak arah 180 derajat sumbu x, pada gambar 4.10 pada titik AB ke BC sebesar 21,178 meter.

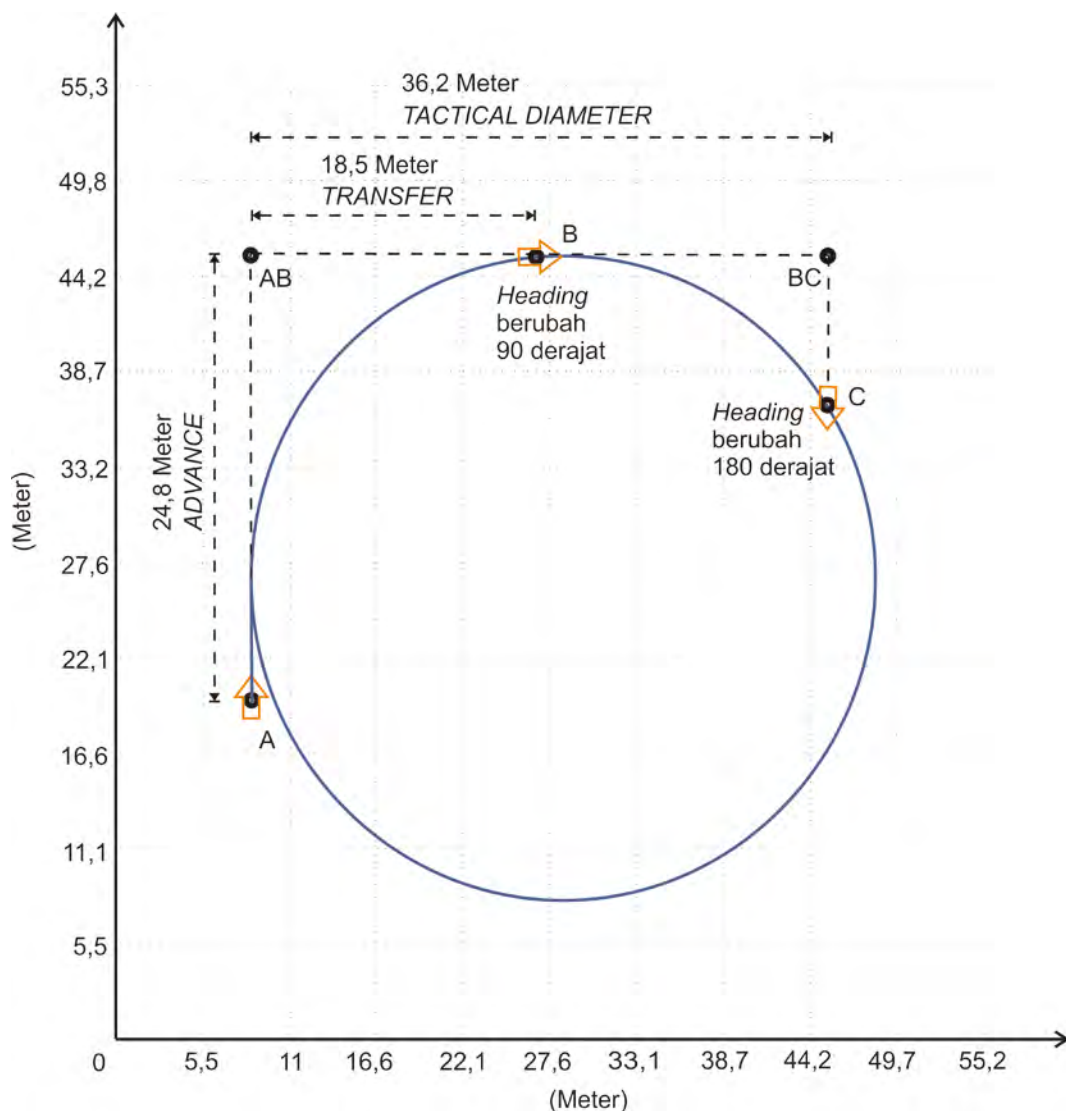


**Gambar 4.10** Evaluasi kriteria pengujian *turning circle* 20 derajat

#### 4.3.3 Evaluasi Kriteria Kapal Pada *Turning Circle* 10 Derajat

Dari hasil pengujian *turning circle* sudut rudder 10 derajat pada subbab 4.1.3, didapatkan evaluasi kriteria kapal pada gambar 4.11. Gambar tersebut adalah visualisasi dalam satuan meter dari gambar 4.6. Dari data eksperimen, diketahui titik A merupakan awal kapal bergerak yaitu berada di koordinat (lintang -7,276914 dan bujur 112,790817) bergerak 265 derajat arah *heading* kapal. Titik B merupakan posisi kapal ketika bergerak 90 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,277085 dan bujur 112,790588) bergerak 355

derajat arah *heading* kapal. Titik C merupakan posisi kapal ketika bergerak 180 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276994 dan bujur 112,790451) bergerak 85 derajat arah *heading* kapal. Titik AB merupakan proyeksi siku dari awal kapal bergerak dan telah mencapai 90 derajat arah *heading* kapal, berada di koordinat (lintang -7,277153 dan bujur 112,790708). Titik BC merupakan proyeksi siku kapal telah mencapai 90 derajat dan 180 derajat arah *heading* kapal, berada di koordinat (lintang -7,277031 dan bujur 112,790431).



**Gambar 4.11** Evaluasi kriteria pengujian *turning circle* 10 derajat

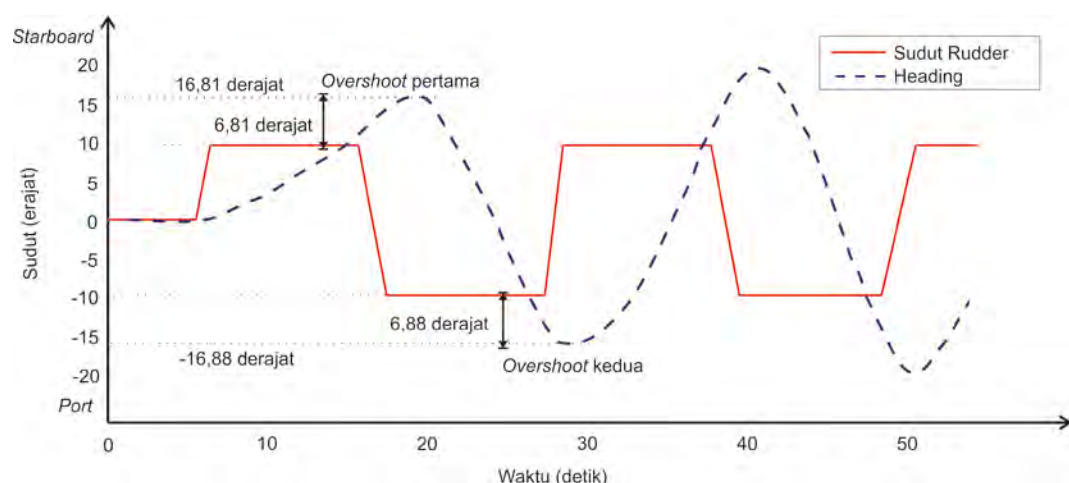
Jarak *advance* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu y, pada gambar 4.11 pada titik A ke AB sebesar 24,79 meter. Jarak *transfer* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga



kapal bergerak arah 90 derajat sumbu x, pada gambar 4.11 pada titik AB ke B sebesar 18,511 meter. Jarak *tactical diameter* adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 180 derajat sumbu x, pada gambar 4.11 pada titik AB ke BC sebesar 36,218 meter.

#### 4.3.3 Evaluasi Kriteria Kapal pada Zig-Zag 10 Derajat

Evaluasi kriteria kapal tidak hanya dilakukan pada uji *turning circle* dengan sudut rudder sebesar 35, 20, dan 10 derajat, tetapi juga dilakukan pada uji zig zag dengan sudut rudder yang sama seperti uji *turning circle* yaitu sebesar 35, 20, dan 10 derajat. Dari hasil uji zig zag sudut rudder 10 derajat pada subsubbab 4.2.1, didapatkan hasil evaluasi kriteria pada gambar 4.12. Dari data eksperimen pengujian *zig-zag* 10 derajat diketahui belokan pertama nilai *heading* sebesar 16,81 yaitu pada detik ke 19. Sedangkan pada belokan kedua nilai *heading* sebesar -16,88 yaitu pada detik ke 29,6. Sudut *overshoot* pertama yang dihasilkan pada belokan pertama sebesar 6,81 derajat. Sudut *overshoot* kedua yang dihasilkan pada belokan pertama sebesar 6,88 derajat. IMO memberi standar pengujian *zig-zag* 10 derajat bahwa sudut *overshoot* pertama tidak lebih dari 10 derajat dan sudut *overshoot* kedua tidak lebih dari 10 derajat. Dari hasil evaluasi tersebut, maka kapal perng kelas SIGMA *extended* memenuhi kriteria standar pengujian *zig-zag* 10 derajat oleh IMO.

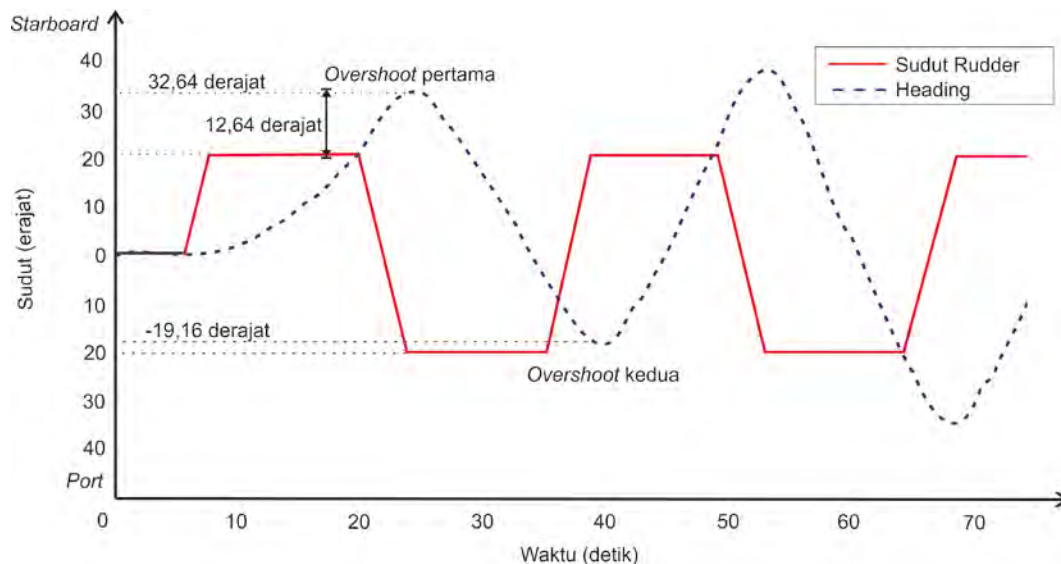


**Gambar 4.12** Evaluasi kriteria pengujian *zig-zag* 10 derajat



#### 4.3.4 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Zig-Zag 20 Derajat

Evaluasi kriteria kapal pada uji *zig-zag* dengan sudut rudder sebesar 20 derajat berdasarkan subsubbab 4.2.2 Gambar 4.4 didapatkan evaluasinya pada Gambar 4.13. Dari data eksperimen pengujian *zig-zag* 20 derajat diketahui belokan pertama nilai *heading* sebesar 32,64 yaitu pada detik ke 24. Sedangkan pada belokan kedua nilai *heading* sebesar -19,16 yaitu pada detik ke 39,9. Sudut *overshoot* pertama yang dihasilkan pada belokan pertama sebesar 12,64 derajat. IMO hanya memberi standar untuk pengujian *zig-zag* 20 derajat bahwa sudut *overshoot* pertama tidak lebih dari 20 derajat. Dari hasil evaluasi tersebut, maka kapal perang kelas SIGMA *extended* memenuhi kriteria standar pengujian *zig-zag* 20 derajat oleh IMO.



**Gambar 4.13** Evaluasi kriteria pengujian *zig-zag* 20 derajat

#### 4.4 Hasil Evaluasi Kriteria Pengujian Manuver Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* Skala 3 Meter

Dari pengujian *turning circle* dengan sudut *rudder* 35 derajat dan *zig-zag* dengan sudut *rudder* sebesar 10 dan 20 derajat, diperoleh data koordinat posisi lintang dan bujur melalui sensor GPS. Data koordinat posisi tersebut dilakukan pemetaan, sehingga membentuk lintasan, baik *turning circle* maupun *zig-zag*. Kemudian lintasan dalam satuan koordinat tersebut, dikonversikan ke dalam meter. Sehingga kriteria kapal dapat diketahui seperti pada Tabel 4.1. Pada tabel

4.1 diketahui bahwa manuver kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter telah memenuhi standar yang ditetapkan oleh IMO (IMO Resolusi MSC 137 (76), 2002).

**Tabel 4.1** Kestabilan kapal berdasarkan evaluasi kriteria *sea trial* IMO

Pengujian	Kriteria	Hasil eksperimen	Standar IMO	Keterangan
<i>Turning circle</i>	<i>Advance</i>	3,3 Lpp	< 5 Lpp	Memenuhi Standar
35 derajat	<i>Tactical</i>	3,3 Lpp	< 4,5 Lpp	Memenuhi Standar
<i>Zig-zag 10</i> derajat	<i>Overshoot</i> pertama	6,81 derajat	10 derajat	Memenuhi Standar
	<i>Overshoot</i> kedua	6,88 derajat	10 derajat	Memenuhi Standar
<i>Zig-zag 10</i> derajat	<i>Overshoot</i> pertama	12,64 derajat	25 derajat	Memenuhi Standar

#### 4.5 Hasil Perhitungan Parameter Nomoto Kapal Perang Kelas SIGMA

##### *Extended* Skala 3 Meter

Pemodelan dinamika kapal menggunakan struktur model dinamika Nomoto. Data yang digunakan dalam pemodelan Nomoto adalah *turning circle* 20 derajat yang telah mengalami proses filter. Dari hasil perhitungan subbab 3.7 didapatkan nilai K sebesar 0,014,  $T_1$  sebesar 0,052,  $T_2$  sebesar 0,56, dan  $T_3$  sebesar -14,29. menurut standart Nomoto kemampuan maneuver kapal yang baik ditunjukkan dengan nilai K lebih besar dari 0 (Nomoto, 1957). Sehingga dapat disimpulkan kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter memiliki kemampuan maneuver yang baik karena memiliki nilai K sebesar 0,014.

Tabel 4.2 menunjukan kestabilan kapal berdasarkan besar K yang dimiliki, dapat dilihat kapal perang kelas SIGMA *extended* skala 3 meter, dan kapal mariner kelas cargo memiliki nilai K lebih besar dari 0, sehingga kapal tersebut tergolong stabil, sedangkan kapal tanker memiliki nilai K sebesar -0,019 atau kurang dari 0, sehingga dapat dikatakan kapal dalam kondisi tidak stabil.

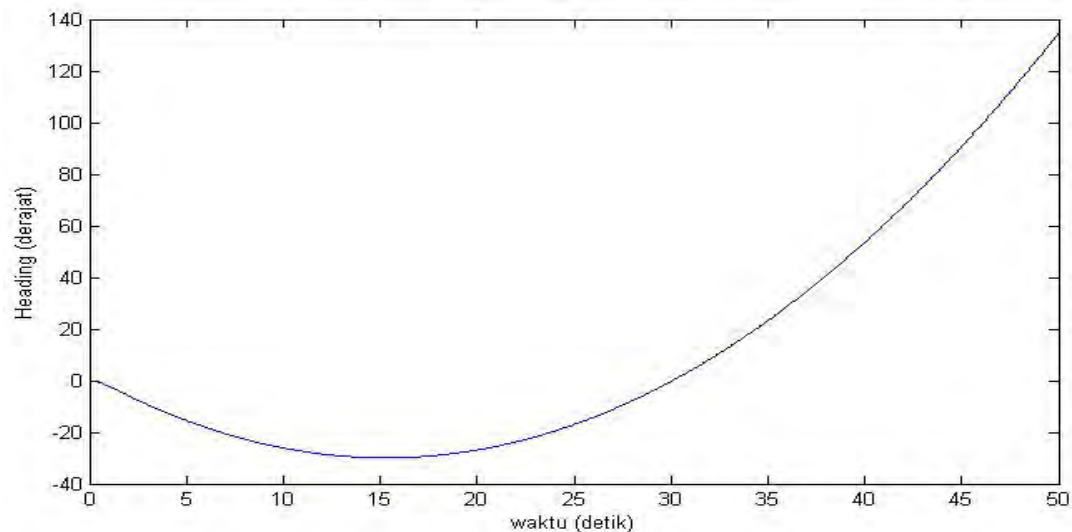
**Tabel 4.2** Kestabilan kapal berdasar nilai parameter model Nomoto

Kapal	K	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	Keterangan
SIGMA skala 3 m	0,014	0,052	0,56	-14,29	kapal stabil
Mariner kelas cargo*	0,185	118	7,8	18,5	kapal stabil
Tanker*	-0,019	-24,1	16,4	46	kapal tidak stabil

\* (Nomoto, 1957)

#### 4.6 Validasi Model Dinamika Kapal Perang Kelas SIGMA secara *Open Loop*

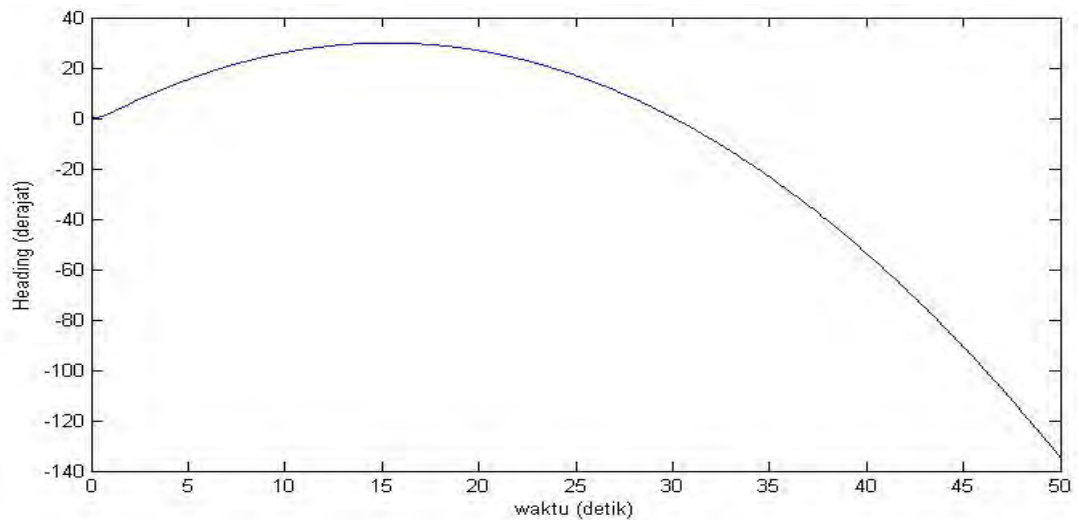
Simulasi *open loop* digunakan untuk mengetahui respon *heading* apabila diberi masukan berupa sinyal step dengan sudut *rudder* sebesar 20 derajat dan -20 derajat berdasarkan standar IMO. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hasil respon dinamika kapal. Gambar 4.14 merupakan respon *heading* saat uji simulasi menggunakan sinyal *step* sebesar 20° terlihat respon bergerak memutar dari arah kiri ke kanan. Dimana *heading* bergerak ke arah kiri selama 15 detik, setelah itu *heading* akan memutar ke arah kanan dengan sudut *heading* semakin besar.



**Gambar 4.14** Respon *heading* pada saat pengujian *turning circle* dengan masukan sudut *rudder* 20 derajaat

Gambar 4.15 merupakan uji simulasi *turning circle* menggunakan sinyal *step* dengan sudut *rudder* sebesar -20°. Berbeda dengan *turning circle* sinyal step dengan sudut *rudder* sebesar 20°, apabila *turning circle* sinyal step dengan sudut

*rudder* sebesar  $-20^0$ , *heading* memutar dari arah kanan ke kiri. Sehingga ketika pengujian dimulai, *heading* akan bergerak ke arah kanan terlebih dahulu selama 15 detik, setelah itu *heading* akan memutar ke arah yang berlawanan seiring bertambahnya waktu maka semakin besar sudut *heading* yang terjadi. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada saat turning step  $20^0$  maka *heading* akan bergerak memutar dari kiri ke kanan, sedangkan pada turning step  $-20^0$ , *heading* akan bergerak memutar dari kanan ke kiri.



**Gambar 4.15** Respon *heading* pada saat pengujian *turning circle* dengan masukan sudut *rudder*  $-20$  derajat

**----Halaman ini sengaja dikosongkan----**

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan pada bab IV, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengujian *turning circle* 35 derajat menghasilkan jarak *advance* sebesar 3,3 Lpp, jarak *transfer* sebesar 1,8 Lpp dan jarak *tactical diameter* sebesar 3,3 Lpp.
2. Pengujian *turning circle* 20 derajat menghasilkan jarak *advance* sebesar 6,2 Lpp, jarak *transfer* sebesar 3,4 Lpp dan jarak *tactical diameter* sebesar 7 Lpp.
3. Pengujian *turning circle* 10 derajat menghasilkan jarak *advance* sebesar 8,2 Lpp, jarak *transfer* sebesar 6,1 Lpp dan jarak *tactical diameter* sebesar 12 Lpp.
4. Pengujian *zig-zag* 10 derajat diperoleh sudut *overshoot* pertama sebesar 6,81 derajat dan sudut *overhoot* kedua sebesar 6,88 derajat.
5. Pengujian *zig-zag* 20 derajat menghasilkan sudut *overshoot* pertama sebesar 12.64 derajat.
6. Hasil pengujian manuver memenuhi standar IMO.
7. Nilai parameter kapal secara model Nomoto adalah K sebesar 0,014,  $T_1$  sebesar 0,052,  $T_2$  sebesar 0,56 dan  $T_3$  sebesar -14,286.

**----Halaman ini sengaja dikosongkan----**

## DAFTAR PUSTAKA

- Li, Y., Landsburg, A., Barr, R., & Calisal, S. (2005). Improving ship maneuverability standards as a means for increasing ship controllability and safety. *OCEANS*, 1972 - 1981 Vol. 3.
- Thor I. Fossen and Tristan Perez “*Kalman Filtering for Positioning and Sudut heading Control of Ships and Offshore Rigs*”, *Control System Magazine* (2009).PP.32-46.
- K. S. M. Davidson and L. I. Schiff, “Turning and course keeping qualities,” in *transactions of SNAME*, vol. 54, 1946.
- SNAME, “Nomenclature for treating the motion of submerged body through a fluid,” The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research bulletin 1-5, 1950.
- K. Nomoto, T. Taguchi, T. Honda, and S. Hirano, “On the steering qualities of ships,” *International Shipbuilding Progress*, Tech. Rep., 1957.
- Fossen, Thor I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Marine Vehicles*. John Wiley and Sons Ltd. New York.
- Fossen, T. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics.
- SNAME (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *Technical Report Bulletin 1-5*. Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, USA.
- C. Shi, D. Zhao, J. Peng, & C. Shen. (2009). Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters. *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 105-110.
- Chang-Zhong Pan, Xu-Zhi Lai, Simon X. Yang, & Min Wu. (2013). An efficient neural network approach to tracking control of an autonomous surface vehicle with unknown dynamics. *Expert Systems with Applications*, 1629-1635.
- L. Moreira, & C. Guedes Soares. (2003). Dynamic model of manoeuvrability using recursive neural networks. *Ocean Engineering*, 1669–1697.



- Anna Witkowska, & Roman Śmierzchalski. (t.thn.). Identifying Ship Parameters with the Aid of Genetic Algorithm. *article*, 8.
- Suleiman, B. M. (2000). Identification of Finite-Degree-of-Freedom Models for Ship Motions. *Dissertation*, 167.
- Tristan Pérez, & Mogens Blanke. (1998). Mathematical Ship Modeling for Control Applications. *Technical Report*, 22.
- Ljung, L. (1999). Theory for the user. *System Identification*, sweden.
- Ljung, L. (2009). Perspectives on System Identification. 13.

## BIOGRAFI PENULIS



Ridho Akbar lahir di Lumajang 05 Mei 1989, merupakan putra pertama dari dua bersaudara. Menamatkan jenjang pendidikan S1 Teknik Otomasi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya periode 2007-2011. Dengan judul tugas akhir “*Report Software Web SCADA Pengendalian Kecepatan Motor Ac 3 Fasa Dengan Menggunakan Sistem Redundant Berbasis Plc Omron*”. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan S2 Teknik Fisika di Institute Teknologi Sepuluh Nopember 2012. Dengan judul tesis “*Pemodelan Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter Berbasis Eksperimen*”.

**----Halaman ini sengaja dikosongkan----**